



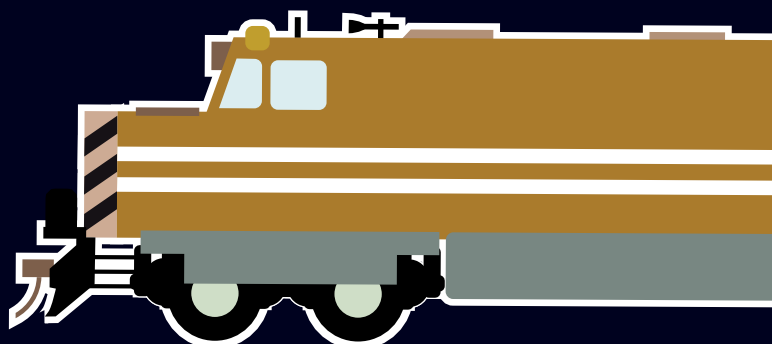
26° Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

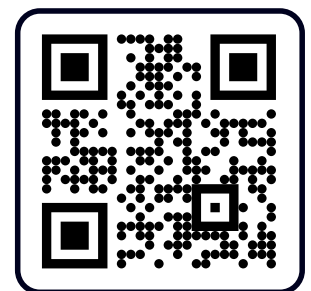
Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br

ANAIS DO CONGRESSO



ABDER



Centro de Convenções AM Malls - Sergipe
Av. Pres. Tancredo Neves, 4444
Inácio Barbosa

Aracaju – SE



COMISSÃO ORGANIZADORA

Presidentes da C.O.:

Presidente da ABDER – Fauzi Nacfur Junior
Diretora-Presidente da ABPv – Luciana Nogueira Dantas
Diretor Geral do DER/SE – Anderson das Neves Nascimento

Coordenadores da C.O.:

ABDER – Fauzi Nacfur Junior (Coordenador)	ABDER – Rui Corrêa Vieira
ABPv – Luciana Nogueira Dantas (Coordenadora)	ABDER – Maurício Theodósio Mattos Marques
DER/SE – Anderson das Neves Nascimento (Coordenador)	ABDER – Paulo Roberto Almeida Araujo
SETUR – Marcos Leite Franco Sobrinho – SETUR (Coordenador)	ABPv – Cassio Alberto Teoro do Carmo
DER/SE – Frederico Galindo de Góes (Coordenador)	DER/SE – Tales Philippe Rodrigues Araújo
	DER/SE – Roseli dos Santos Silva
	SETUR – Daniela Mesquita Santos

Coordenadores Setoriais da C.O.:

I – Comissão Técnico-Científica:

DER/SE – Joelson Hora Costa (Coordenador)	ABPv – Luciana Nogueira Dantas
SEDURBI – Igor Ribeiro de Albuquerque (Coordenador Adjunto)	ABPv – Cassio Alberto Teoro do Carmo
DER/SE – Ancelmo Luiz de Souza	ABPv – Lélío Brito
DER/SE – Alzênia Menezes Silveira	UFRGS – Bethânia Machado Correa
ABDER – Rui Corrêa Vieira	UFRGS – Gracieli Bordin Colpo
	UFRGS – Thais Radünz Kleinert

II – Comissão Administrativo e Financeiro:

ABDER – Rui Corrêa Vieira (Coordenador)	SETUR – Igor Augusto Fontes Menezes
ABDER – Maurício Theodósio Mattos Marques (Coordenador Adjunto)	ABPv – Georgina Libório Azevedo Braga
DER/SE – Tales Philippe Rodrigues Araújo	ABPv – João Vicente Falabella Fabrício
DER/SE – Tatiane de França Cruz	



III – Comissão de Infraestrutura e TI:

- | | | | |
|---------------|---|---------------|--|
| ABDER | – Paulo Roberto Almeida Araujo
(Coordenador) | ABDER | – Rui Corrêa Vieira |
| DER/SE | – Antônio Santana Rabelo
(Coordenador Adjunto) | ABDER | – Maurício Theodósio Mattos
Marques |
| DER/SE | – José Antônio Vieira
(Coordenador Adjunto) | ABDER | – Jorge Luis Miranda Nazaré |
| SETUR | – Gabriel Silva Santana de Oliveira | ABPv | – Luciana Nogueira Dantas |
| | | ABPv | – Cassio Alberto Teoro do Carmo |
| | | DER/SE | – Rennan Mecnas Silva
Albuquerque |

IV – Comissão de Logística e Transporte:

- | | | | |
|---------------|--|---------------|------------------------------------|
| DER/SE | – Paulo Vinicius de Andrade
(Coordenador) | DER/SE | – Geraldo Moraes Mota Filho |
| DER/SE | – Everton da Cruz Menezes
(Coordenador Adjunto) | DER/SE | – Marcio Murilo Arcieri de Almeida |
| FUNCAP | – Gustavo Bastos Paixão
(Coordenador Adjunto) | DER/SE | – Genilson Gois de Almeida |
| | | ABDER | – Rui Corrêa Vieira |
| | | ABPv | – Georgina Libório Azevedo Braga |
| | | ABPv | – João Vicente Falabella Fabrício |

V – Comissão de Marketing e Comunicação:

- | | | | |
|---------------|---|---------------|---------------------------------|
| DER/SE | – Roseli dos Santos Silva
(Coordenadora) | ABPv | – Cassio Alberto Teoro do Carmo |
| SETUR | – Allan Alberto Santos de Oliveira
(Coordenador Adjunto) | ABPv | – Victor de Oliveira Nunes |
| DER/SE | – Saulo Aragão Santana | ABPv | – Rafael Lopes Martins. |
| ABDER | – Rui Corrêa Vieira | DER/SE | – Jusinaldo Alves dos Santos |
| | | ABDER | – Larissa Alves da Silva |
| | | ABDER | – Eudes Lopes Borges Filho |

VI – Comissão Comercial:

- | | | | |
|--------------|--|---------------|---------------------------------|
| ABPv | – Cassio Alberto Teoro do Carmo
(Coordenador) | DER/SE | – Anderson das Neves Nascimento |
| ABDER | – Rui Corrêa Vieira
(Coordenador Adjunto) | SETUR | – Marcos Leite Franco Sobrinho |

Secretárias da ABDER:

Elaine Cristina Araujo

Gilmara Kelly Marinho Serra

Secretária da ABPv:

Elizabeth Vilar Pascoal

COMITÊ AVALIADOR

Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena (UFCG)
Anelise Schmitz (UFPR)
Assis Rodrigues Abbud Villela (EIXO SP)
Bethania Machado Correa (UFRGS)
Breno Salgado Barra (UFSC)
Camila Kern (UFRGS)
Carla Borjaille (IFES)
Cássio Alberto Teoro do Carmo (ABPV)
Cecília Fortes Merighi (GRUPO ECORODOVIAS)
Celso Luiz dos Santos Romeiro Júnior (ARTERIS)
Charles Alves (GRUPO ECORODOVIAS)
Cleber Faccin (UFSM)
Deise Elise Guerra Favero (UFRGS)
Deividi Pereira (UFSM)
Diego Menegusso Pires (INFRATEST)
Douglas Martins Mocelin
(GRUPO ECORODOVIAS)
Elisa Quint de Souza de Oliveira (AUTÔNOMO)
Fábio Freire (UTFPR)
Fernando Silva Albuquerque (UFS)
Filipe Almeida Corrêa do Nascimento (IME)
Francisco Garonce (INPROTRAN)
Gabriel Grassioli Schreinert (SIE-SC)
Geraldo Luciano de Oliveira Marques (UFJF)
Gisandra Faria de Paula (DER-DF)
Giuseppe Miceli Junior (IME)
Glicério Trichês (UNESC)
Gracieli Bordin Colpo (PUCRS)
Guilherme Venson (UNIOESTE)
Helena Lunkes Strieder (UFRGS)
Helena Szortika Quadros (BUREAU VERITAS DO
BRASIL SOC CLAS E CERTIFICADORA LTDA)
Henrique Falck Grimm (UFRGS)
Iuri Bessa (UFC)
Iuri Lara (AUTÔNOMO)
Jaelson Budny (UNIPAMPA)
Jefferson Artigas Guerra (DER-PR)
Jeovanesa Régis Carvalho (UFS)
Jesner Sereni Ildefonso (UEM)
João Rodrigo Guerreiro Mattos (UFSM)
Joelson Hora Costa (DER-SE)
Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
Jose Leomar Fernandes Junior (USP)
Klaus Machado Theisen (UFPEL)
Larissa Montagner de Barros
(STRATURA ASFALTOS)
Larissa Vieira (DER-PR)
Laura Maria Goretti da Motta (UFRJ)
Laura Mazzoni (USP)
Lélio Antônio Teixeira Brito (UFRGS)
Leonardo Lunkes Wagner (URI)
Liamara Paglia Sestrem (UFPR)
Lilian Gouveia (UEPG)
Liseane Padilha Thives (UFSC)
Luana Rossini Augusti (DAER-RS)
Lucas Delongui (UFSM)
Lucas Dotto Bueno (UFSM)
Lucas Heller (UFRGS)
Luciana Nogueira Dantas (DNIT)
Luciana Rohde (UFSC)
Luciano Pivoto Specht (UFSM)
Luis Alberto Hermann Nascimento (PETROBRAS)
Luis Miguel Gutierrez Klinsky (GRUPO CCR)
Luiza Oceano Martins (IPOS ESPECIALIZAÇÃO)
Marcos Jabor (DER-MG)
Marlova Grazziotin Johnston (UFRGS)
Matheus David Inocente Domingos (UTFPR)
Megid Jamil Junior (INPROTRAN)
Mônica Garcez (UFRGS)
Monica Sayoco Nishibe Moraes (DER-SP)
Monica Velloso (AUTÔNOMO)
Natalia de Souza Corrêa (UFSCAR)
Rafael Martins (KRATON)
Reuber Freire (UFPE)
Rinaldo José Barbosa Pinheiro (UFSM)
Rita Moura Fortes (IFSP)
Rodrigo Malysz (ECOPLAN)
Rodrigo Weber (UNIVATES)
Rogério Calazans (DNIT)
Romário de Jesus Santos
(FACULDADE PIO DÉCIMO)
Rosângela dos Santos Motta (USP)
Silvio Lisboa Schuster (UFSM)
Thaís Aquino dos Santos (UFSM)
Thaís Radünz Kleinert (UFRGS)
Valéria Cristina de Faria (AUTÔNOMO)
William Fedrigo (GRUPO CCR)
Willian Polzl (DER-PR)
Zila Maria Mascarenhas (USP)



**26° Enacor
49ª RAPV**

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

Publicação da Rapv Enacor

25° Enacor

Telefones:

(61) 3321-3109

(61) 3224-0541

(61) 98416-9912

Site:

www.abder.org.br

48ª RAPV

(21) 2233-2020

Site:

www.abpv.org.br

E-mail:

evento@RAPvENACOR.com.br

Edição Eletrônica

ISSN: 1807-5568

Editores:

Rui Corrêa Vieira

Maurício Marques

Projeto gráfico:

Renovacio Criação

(61) 3021-0098

Diagramação:

Autores dos trabalhos

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em sistemas de recuperação, ou transmitida de qualquer forma ou por qualquer meio – eletrônico, mecânico, fotográfico, gravação ou qualquer outro – sem a expressa permissão prévia dos editores, com exceção de breves trechos de artigos de revistas e/ou revisões críticas. As ilustrações que não foram referenciadas são de domínio público, com acesso livre pela Internet.

Índice por Tema

**DESEMPENHO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS53**

**TECNOLOGIAS E METODOLOGIAS
PARA AVALIAÇÃO E GESTÃO DA
INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA200**

**DIMENSIONAMENTO DE
PAVIMENTOS: ENSAIOS, CRITÉRIOS E
METODOLOGIAS308**

**SUSTENTABILIDADE EM MATERIAIS DE
PAVIMENTAÇÃO424**

RECICLAGEM DE PAVIMENTOS548

**SEGURANÇA VIÁRIA E GESTÃO DE
RISCO EM RODOVIAS.....628**

**TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO,
RESTAURAÇÃO E CONSERVAÇÃO DE
PAVIMENTOS737**

**GESTÃO E MELHORIA NA
INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA:
PARÂMETROS, MODELAGEM E
PROCEDIMENTOS886**

**MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO -
LIGANTES ASFÁLTICOS, SOLOS E
AGREGADOS936**

**ESTABILIZAÇÃO DE MATERIAIS DE
PAVIMENTAÇÃO1030**

**INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA
E SUSTENTABILIDADE:
MONITORAMENTO, RESILIÊNCIA E
IMPACTOS CLIMÁTICOS1125**

**AVANÇOS TECNOLÓGICOS E
METODOLOGIAS NA PAVIMENTAÇÃO E
GESTÃO RODOVIÁRIA.....1230**

Índice

DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

DOI: 10.29327/1430212.49-28

ANÁLISE DA DENSIFICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS NO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE EM FUNÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA E DA ESPESSURA DA CAMADA 55

Douglas Antônio Thiel, Allan Monteiro Silva, Ana Carolina Ostrovski e Andreia Raffler

INTRODUÇÃO	56
MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
CONCLUSÃO.....	62
REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	62

DOI: 10.29327/1430212.49-32

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE GOLPES NA COMPACTAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CPA 64

Victor Manuel de Queiroz Lourenço, Aline Cristina de Andrade Lima, Caroline Cristina Pereira dos Santos & Joelson Hora Costa

INTRODUÇÃO	64
REFERENCIAL TEÓRICO	65
MATERIAIS E MÉTODOS.....	66
Moldagem dos corpos de prova	67
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS	72

DOI: 10.29327/1430212.49-18

**ASFALTO REJUVENESCIDO BENEFICIADO AFRIO
PARA USO EM OPERAÇÃO TAPABURACOS..... 76**

Jose Rodolfo Rodrigues, Renata Monte

CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DO ESTUDO	77
PROCESSO DE PAVIMENTAÇÃO	77
PROCESSO DE BENEFICIAMENTO	77
ADITIVO REJUVENESCEDOR	78
ADITIVO FABRICANTE "A"	78
ADITIVO FABRICANTE "B"	78
ESTUDO DE CASO	79
APLICAÇÃO DE MISTURA BENEFICIADA COM ADITIVO FABRICANTE "A"	79
APLICAÇÃO DE MISTURA BENEFICIADA COM ADITIVO FABRICANTE "B"	81
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

DOI: 10.29327/1430212.49-38

**ANÁLISE DE CONCRETO ASFÁLTICO ESTOCÁVEL
PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS 85**

Arthur Henrique Moizinho, Kássio Gomes Fialho & Joel Carlos Moizinho

INTRODUÇÃO	86
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	86
OBJETIVO DA PESQUISA	87
MATERIAIS E MÉTODOS.....	88
RESULTADOS	92
CONCLUSÃO	95
AGRADECIMENTOS	95
REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	95

DOI: 10.29327/1430212.49-43

**ADEQUAÇÕES À PRÁTICA LOCAL DO DAER/RS NAS COMPOSIÇÕES
DE CONCRETO ASFÁLTICO DA METODOLOGIA SICRO 97**

Mara Regina Bianchini, Bibiana Cardoso Fogaça

INTRODUÇÃO	98
Análise da composição da usinagem do concreto asfáltico, conforme metodologia SICRO.....	98
Análise da composição média do concreto asfáltico utilizado nas obras no âmbito do DAER/RS	100
Adequações entre a composição do concreto asfáltico conforme metodologia SICRO com a composição média identificada nas obras no âmbito do DAER/RS	102
RESULTADOS E ANÁLISES	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO DE ASFALTO DE ALTO MÓDULO MODIFICADO COM POLÍMERO À BASE DE POLIETILENO E SUA INFLUÊNCIA EM MISTURA ASFÁLTICA MORNA..... 104

Andressa Zampieri Rosa, Gustavo Oliveira Couto, Jesner Sereni Ildefonso, Thayná Yamamoto Fávero, Gabriela do Prado Ferreira, Fabricio de França Fernandes e Luiz Henrique de Assis Fagundes

INTRODUÇÃO	105
MATERIAIS E MÉTODOS.....	106
Agregados.....	106
Ligante.....	107
Ensaio reológico no ligante e análise mecânica da mistura	107
Classificação PG (<i>Performance Grade</i>).....	108
Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas - MSCR (<i>Multiple Stress Creep and Recovery</i>)	108
Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear - LAS (<i>Linear Amplitude Sweep</i>).....	108
Projeto de mistura	108
Teste roda de Hamburgo em misturas asfálticas compactadas - DWT Test (<i>Test Double Wheel Tracker</i>).....	108
Determinação do módulo de resiliência	109
RESULTADOS	109
Classificação PG.....	109
Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas - MSCR	111
Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear - LAS	112
Dosagem do corpo de prova e avaliação das propriedades.....	112
Teste roda de Hamburgo em misturas asfálticas compactadas - DWT	113
Determinação do módulo de resiliência	113
CONCLUSÕES	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA MISTURA ASFÁLTICA COM ALTA RESISTÊNCIA A FADIGA..... 116

Anna Clara Nascimento de Abreu, Fernando Silva Albuquerque

INTRODUÇÃO	117
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	118
MÉTODOLOGIA.....	119
Caracterização dos materiais.....	119
Dosagem Marshall	120
RESULTADOS	121
Resistência a tração por compressão diametral (RTCD)	121
Módulo de resiliência (MR)	122
Ensaio de fadiga por compressão diametral à tração controlada.....	122
CONCLUSÕES	125
REFERÊNCIAS	125

DOI: 10.29327/1430212.49-19

APLICAÇÃO DO ENSAIO IDEAL-CT PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS 127

Rodrigo Leandro, Andher Paulo Capanema Santana

INTRODUÇÃO	128
MATERIAIS E MÉTODO EXPERIMENTAL	130
Materiais utilizados.....	130
Preparo das amostras.....	131
Ensaio de IDEAL-CT	132
APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	134
CONCLUSÕES	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

DOI: 10.29327/1430212.49-45

COMPARAÇÃO DO PARÂMETRO FATOR DE FADIGA DA MISTURA (FFM) OBTIDO POR DIFERENTES ENSAIOS 139

Lucas Aragão Lira, Arthur Moreira Veras, Iuri Sidney Bessa, Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos, Juceline Batista dos Santos Bastos, Beatriz Chagas Silva Gouveia & Jorge Barbosa Soares

INTRODUÇÃO	140
MATERIAIS	143
MÉTODOS	144
Módulo Dinâmico ($ E^* $)	144
Fadiga por Tração-Compressão (T-C)	145
Fadiga por Compressão Diametral (CD)	145
RESULTADOS E DISCUSSÕES	145
Módulo Dinâmico ($ E^* $)	145
Fadiga por Tração-Compressão (T-C)	146
Fadiga por Compressão Diametral (CD)	148
CONSIDERAÇÕES FINAIS	149
AGRADECIMENTOS	150
REFERÊNCIAS	150

DOI: 10.29327/1430212.49-42

EXPLORANDO O DESEMPENHO DE FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM BASE NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO LINEAR..... 152

Marcos Lamha Rocha, Alexis Jair Enríquez-León, Leni Figueiredo Mathias Leite, Francisco Thiago Sacramento Aragão, Larissa Montagner de Barros & Luis Alberto Herrmann do Nascimento

INTRODUÇÃO	153
METODOLOGIA	156
RESULTADOS	157
CONCLUSÕES	162
AGRADECIMENTOS	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	163

UTILIZAÇÃO DO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE® (CGS) NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA) 164

Edilza Rakel Nóbrega Cavalcanti, Talita Miranda de Sousa, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, Osires de Medeiros Melo Neto & Maria Ingridy Lacerda Diniz

INTRODUÇÃO	165
METODOLOGIA.....	166
Materiais.....	166
Ligante Asfáltico	166
Agregados.....	166
Métodos.....	167
Dosagem	167
Caracterização Mecânica E Hidráulica Da Mistura CPA	168
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	169
Determinação Do Volume De Vazios.....	169
Determinação Do Desgaste Por Abrasão - Cântabro	170
Resistência À Tração Indireta Por Compressão Diametral.....	171
Teor De Projeto De Ligante	171
Caracterização Da Mistura Com Teor De Projeto De Ligante.....	171
CONCLUSÕES	173
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	174

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM USO DE ESCÓRIA DE BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO 176

Nayara Juliana Jargemboski Piazero Benkendorff, Breno Salgado Barra, Natan Assis Monteiro, Rafael Cristyan Fronza

INTRODUÇÃO	177
CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE ESCÓRIA DE BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO	177
MATERIAIS E MÉTODOS.....	178
Materiais	178
Métodos	181
Ensaio Laboratoriais	181
RESULTADOS E DISCUSSÕES	182
Habilidade de Compactação na PCG	182
Resistência à ação deletéria da água	183
Deformação Permanente	183
Ensaio de lixiviação e análise de pH	184
CONCLUSÕES	185
REFERÊNCIAS	186

DOI: 10.29327/1430212.49-60

MODIFICAÇÃO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS DRENANTES NA INDÚSTRIA DA PAVIMENTAÇÃO: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO 188

João Paulo Marçal de Souza, Jessica Duarte Ribeiro Vieira, Fabiana Araujo Maia, Mayara Silva Siqueira, Hannah Dora de Garcia e Lacerda, Diego de Paiva Bezerra & Luísa Eduarda Lucena de Medeiros

INTRODUÇÃO	189
METODOLOGIA.....	190
Levantamentos bibliográficos.....	190
Técnicas relacionais	191
Técnicas avaliativas	191
RESULTADOS E DISCUSSÃO	191
Rede de trabalhos: a cooperação entre autores	192
Cooperação geográfica e institucional	194
Análise por palavras-chave	196
CONSIDERAÇÕES FINAIS	198
AGRADECIMENTOS	198
REFERÊNCIAS	198

TECNOLOGIAS E METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO E GESTÃO DA INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA

DOI: 10.29327/1430212.49-90

AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DISTINTOS PELO MÉTODO DA MANCHA DE AREIA..... 202

Suzane Nogueira da Silva, Matheus Chagas Vital, Carlos Bruno da Silva Fernandes, Lucas Cavalcante de Almeida, Francisco Heber Lacerda de Oliveira

INTRODUÇÃO	203
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	204
Textura Superficial	204
Ensaio da Mancha de Areia	205
Macrotextura e Interação Pneu-Pavimento: Atrito, Ruído e Drenagem	205
Influência do Tipo de Revestimento na Macrotextura	206
MATERIAIS E MÉTODOS	206
Descrição dos Locais de Ensaio	206
Procedimento do Ensaio da Mancha de Areia e Classificação da Macrotextura	207
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	208
Trecho da Rodovia BR-122 – Revestimento com CA (antigo), CA (recém aplicado) e Binder	208
Trecho da Rodovia CE-513 – Revestimento em AAUF	209
Trecho da Rodovia CE-580 – Revestimento em TSD.....	210
CONCLUSÃO	212
REFERÊNCIAS	212

DOI: 10.29327/1430212.49-95

APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINA PARA A DETERMINAÇÃO DA MACROTEXTURA EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM..... 214

Madalena Osório Leite, Carlos Augusto Uchoa da Silva, Francisco Heber Lacerda de Oliveira

INTRODUÇÃO	215
REFERENCIAL TEÓRICO	215
Macrotextura	215
Aprendizagem de Máquina (Machine Learning)	216
APLICAÇÃO DA MODELAGEM NEURAL	217
Obtenção do banco de dados	218
Análise exploratória das variáveis	218
Pré-processamento dos dados	220
Definição da Arquitetura da Rede Neural Neural	221
Neural Network Fitting (Nftool) com 1 camada intermediária	221
ANÁLISES E DISCUSSÕES	223
CONCLUSÕES	224
REFERÊNCIAS	225

DOI: 10.29327/1430212.49-93

GESTÃO DE PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS: UMA ABORDAGEM COM TECNOLOGIA DE MONITORAMENTO 226

Rodrigo Santos Colares, Esther Ribeiro Júlio & Letícia Gonçalves Costa Munhoz

INTRODUÇÃO	227
CONTEXTUALIZAÇÃO.....	228
METODOLOGIA EMPREGADA	229
DESCRIÇÃO	229
DISCUSSÃO	231
CONCLUSÃO	235
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	237

DOI: 10.29327/1430212.49-92

ESTUDO DE CASO: UTILIZAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS PARA CATALOGAÇÃO E MONITORAMENTO DA MALHA RODOVIÁRIA DA 26° UNIDADE REGIONAL DO DER/MG .. 238

Érica Francisca de Paula Araújo, Samuel Passos , Glaucus Dornas, Wesley Fernando Cruz Santos & Mauro Alexandre Gomes

INTRODUÇÃO	239
REFERENCIAL TEÓRICO	240
METODOLOGIA	241
RESULTADOS	244
CONCLUSÃO.....	248
REFERÊNCIAS	248

ANÁLISE DE MODELOS DE PREVISÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS A PARTIR DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO PAVIMENTO..... 250

Eduarda Lemos Rodrigues, Leônidas Augusto da Silva, Andriele Ambros de Oliveira, Renan Gustavo Scherer, Deividi da Silva Pereira, Luciano Pivoto Specht & Lucas Dotto Bueno

INTRODUÇÃO	251
IRREGULARIDADE LONGITUDINAL	251
Modelo de Bueno et al. (2022)	252
RELAÇÃO ENTRE IRI E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	252
METODOLOGIA	253
MODELOS DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	254
Modelo do GEIPOT (1982)	254
Modelo Sul-africano (1984)	255
Modelo do HDM-3 (1987)	255
Modelo de Du Plessis, Visser e Curtayne (1990)	255
Modelo do NRC (2006)	256
Modelo do software HDM-4 (2006)	256
Modelo de Svenson e Fjeld (2012)	256
Modelo do VTI (2012)	256
Modelo de Okte; Al-Qadi e Ozer (2019)	257
Modelo do MapEUR (2021)	257
SIMULAÇÕES DOS MODELOS DE PREVISÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	257
CONSIDERAÇÕES FINAIS	259
AGRADECIMENTOS	260
REFERÊNCIAS	260

GESTÃO DE ATIVOS RODOVIÁRIOS ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DATA-DRIVEN E BIM 262

Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli, Marcelo Franco Porto, Flaviane Beltrão Silva, Matheus Guimarães Novais

INTRODUÇÃO	263
Conceitos Fundamentais e Definições	263
METODOLOGIA.....	266
RESULTADOS	268
Status Report dos Ativos Rodoviários	269
CONCLUSÃO	270
AGRADECIMENTOS	271
REFERÊNCIAS	271

DOI: 10.29327/1430212.49-96

DEFEITOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: ESTUDO DE CASO EM ESTRADA QUE INTERLIGA OS MUNICÍPIOS DE MISSAL E ITAIPULÂNDIA - PR 274

Priscila Reis, Daniela Kunz, Jaqueline Tomazini Orth & Atilio Lorini

INTRODUÇÃO	275
METODOLOGIA	276
Análise do Índice de Gravidade Global (IGG)	276
Local de Estudo	278
RESULTADOS	279
CONSIDERAÇÕES FINAIS	284
REFERÊNCIAS	284

DOI: 10.29327/1430212.49-91

CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL DE PAVIMENTO FLEXÍVEL POR MEIO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE GLOBAL: ESTUDO DE CASO DA CE-513 286

Arlene de Oliveira, José Wémenson Rabelo Chaves, Mariana de Araújo Leite, Lucas Cavalcante de Almeida & Francisco Heber Lacerda de Oliveira

INTRODUÇÃO	287
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	287
MÉTODOS DE PESQUISA	289
RESULTADOS E DISCUSSÕES	290
CONCLUSÕES	293
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	294

DOI: 10.29327/1430212.49-99

VIAS PRINCIPAIS DE ACESSO À ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA EM SALVADOR: UM ESTUDO DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO VISUAL CONTÍNUO 296

Luan Trindade Lopes, Wilton Ferreira Copque & Caroline Dias Amancio de Lima

INTRODUÇÃO	297
DEFEITOS E AVALIAÇÕES EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	298
Levantamento Visual Contínuo	299
DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO	300
Localização e Características das Vias	300
Método de Avaliação	301
RESULTADOS E DISCUSSÕES	304
CONSIDERAÇÕES FINAIS	306

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS: ENSAIOS, CRITÉRIOS E METODOLOGIAS

DOI: 10.29327/1430212.49-14

ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA ENTRE DIFERENTES EQUIPAMENTOS TRIAXIAIS COM MATERIAL SINTÉTICO 310

Priscila Oliveira Folly, Camila Antunes Martins, Luisa Carla de Alencar Menezes, Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

INTRODUÇÃO	311
MÓDULO DE RESILIÊNCIA	311
Conceito estatístico para determinação do MR.....	314
METODOLOGIA	315
RESULTADOS E DISCUSSÕES	318
CONSIDERAÇÕES FINAIS	320
Agradecimentos.....	320
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	320

DOI: 10.29327/1430212.49-9

IMPACTO ECONÔMICO NA PAVIMENTAÇÃO QUANDO DA ANÁLISE MECANÍSTICA-EMPÍRICA CONSIDERANDO MÓDULOS DE RESILIÊNCIA TEÓRICOS E OBTIDOS POR ENSAIOS..... 322

Paulo Costa Fernandes, Gisandra Faria Depaula, Mateus Ribeiro Caetano, Rafael Cerqueira Silva, Vítor do Nascimento e Silva, Josiene Chrystina Ribeiro Cardoso, Fábio Zanchetta

INTRODUÇÃO	323
DADOS DE PROJETO	324
ENSAIOS LABORATORIAIS	327
RESULTADOS E DISCUSSÕES	328
CONCLUSÕES	330
AGRADECIMENTOS	331
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	331

DOI: 10.29327/1430212.49-15

ASPECTOS RELEVANTES DA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA USO EM ANÁLISES NO MeDiNa..... 333

Vanessa Rebouças Santana, Mario Sergio Desouza Almeida, Weiner Gustavo Silva Costa, Maria do Socorro Costa São Mateus, Ítalo Miller Machado Pereira, Acbal Rucas Andrade Achy

INTRODUÇÃO	334
MATERIAIS E MÉTODOS	335
RESULTADOS E DISCUSSÃO	337
Caracterização geotécnica.....	337
Caracterização mecânica.....	341
CONCLUSÃO	342
REFERÊNCIAS	343

DOI: 10.29327/1430212.49-13

ESTUDO DE REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS DE FLECTOMÉTRICOS REALIZADOS COM O TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER DEVICE (TSDD) NO BRASIL..... 345

Felipe Filizzola Camargo, Caio Mascarenhasraul, Cecília Fortes Merighi, Danilo Martinelli Pitta, Claudio Renato Castro Dias, André Felipe Vale

INTRODUÇÃO	346
OBJETIVO E JUSTIFICATIVA	347
MATERIAIS E MÉTODOS.....	347
METODOLOGIA.....	350
APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	353
RESUMO E CONCLUSÃO	354
REFERÊNCIAS	355

DOI: 10.29327/1430212.49-6

PARTICULARIZAÇÃO DO FATOR DE AJUSTAMENTO DAS DEFLEXÕES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS 356

Rodrigo Malysz, Valter de Oliveira Bochi, Natália Guterres Mensch, Kethelin Eloisa Klagenberg Beckert, Diêgo de Almeida Pereira

INTRODUÇÃO	357
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	357
METODOLOGIA.....	359
ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURAS E DEFLEXÃO.....	361
CONCLUSÕES	365
REFERÊNCIAS	366

DOI: 10.29327/1430212.49-12

INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE NO CÁLCULO DO NÚMERO DE SOLICITAÇÕES AO EIXO-PADRÃO PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO..... 368

Monica Sayoco Nishibe Moraes, Yuri Paladino Silva, Carlos Yukio Suzuki, Caio Rubens Gonçalves Santos, Flaviane Melo Lopes Vallejo

INTRODUÇÃO	369
CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO E FATORES DO CÁLCULO DO NÚMERO N	370
CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE INDICADO NA IP-DE-P00/001 E 002 DO DER/SP	371
HIPÓTESES DE CARREGAMENTO	373
CÁLCULO DOS FATORES DE VEÍCULOS	376
COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	378
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	378

**PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DE VOLUME DE TRÁFEGO DE SEGMENTOS
EXPERIMENTAIS – PRO – MeDiNa A PARTIR DE DADOS DO PNCT 380**

Nelson Wargha Filho, Thiago Davi Rosa, Amaro Venancio Junior, Mario Sergio de Souza Almeida, Henrique Petisco de Souza

INTRODUÇÃO	381
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	382
Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT)	382
Dados de Tráfego.....	382
Coleta de dados.....	383
Classificação PNCT.....	384
METODOLOGIA.....	384
Utilização dos dados do PNCT nos segmentos PRO-MeDiNa.....	384
RESULTADOS	386
Rotina Computacional.....	387
A - Importação e seleção de dados.....	387
B - Tratamento dos dados de distâncias	387
C - Organização e separação dos dados	387
D - Input e seleção dos dados do Manual de Tráfego	388
E - Junção dos dados.....	388
F - Tratamento dos dados sem correspondência.....	388
G - Tratamento dos Veículos de Dois Eixos	389
H - Exportação dos Dados Completos	389
I - Exportação dos dados consolidados por classe e dia	389
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	390
REFERÊNCIAS	390

**ANÁLISE DE RISCO EM FUNÇÃO DO CONTROLE TECNOLÓGICO
DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL..... 392**

Felipe Hernandes Cava, Carlos Yukio Suzuki

INTRODUÇÃO E OBJETIVO.....	393
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	393
MÉTODO	395
RESULTADOS	397
Dimensionamento Determinístico	397
Análise Probabilística.....	397
Análise de Risco e de Custo	399
CONCLUSÃO.....	401
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	402

**EFEITO DO EXCESSO DE CARGA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS:
ESTUDO DE CASO EM MINAS GERAIS 403**

Ana Carolina Felício Bicalho, Thais Bergerbarbosa da Silva, Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli, José Maria dos Santos

INTRODUÇÃO	404
LEI DA BALANÇA	404
FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA.....	405
Fator de Equivalência de Carga Empírico	405
Fator de Equivalência de Carga Empírico-Mecanístico	407
ESTUDO DE CASO: RODOVIA EM MINAS GERAIS	407
Dados de Tráfego	408
Pavimento com Estrutura Genérica para o Estado de Minas Gerais.....	410
RESULTADOS	411
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	412
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	414

**COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS 3D E 3D AXISSIMÉTRICO NA ANÁLISE
DE DEFORMAÇÃO VERTICAL DO SUBLEITO SOB CARGA AEROPORTUÁRIA 415**

Lucas Cavalcante de Almeida, Mateus De Oliveira Serafim, Francisco Heber Lacerdade Oliveira

INTRODUÇÃO	416
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	416
MÉTODO DE PESQUISA.....	418
Elaboração da Simulação no <i>Software</i> ABAQUS 2020	418
Análise e Pós-processamento	419
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	420
Análise da <i>Mesh</i> (Malha) e Tempo de Processamento – Modelo 3D e Modelo 3D Axissimétrico	420
Comparativo entre Deformações no Topo do Subleito para Modelo 3D e Modelo 3D Axissimétrico	421
CONCLUSÃO.....	422
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	422

SUSTENTABILIDADE EM MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO

DOI: 10.29327/1430212.49-70

ASFALTO COM PLÁSTICO: UMA INICIATIVA PIONEIRA NO BRASIL NO CONTEXTO MUNDIAL..... 426

Assis Rodrigues Abbud Villela, Emerson Rodrigues Maciel, Driely Mariane Lancarovici Alves,
Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques, Robinson Alexandre de Avila & Larissa Montagner de Barros

INTRODUÇÃO	427
PLÁSTICOS	428
Tipos de Plásticos	428
RECICLAGEM DO PLÁSTICO	429
LOGÍSTICA REVERSA E ECONOMIA CIRCULAR	432
Logística Reversa	432
Economia Circular	432
EXPERIÊNCIAS NA EXECUÇÃO DE ASFALTO COM PLÁSTICO	432
EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS.....	433
Índia	433
Reino Unido	433
Estados Unidos e Austrália	433
Holanda	433
Experiencia Nacional	433
CONSIDERAÇÕES FINAIS	434
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	435

DOI: 10.29327/1430212.49-71

ASFALTO COM PLÁSTICO A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA EXECUTADA NO BRASIL 438

Assis Rodrigues Abbud Villela, Emerson Rodrigues Maciel, Driely Mariane Lancarovici Alves,
Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques, Robinson Alexandre de Avila & Larissa Montagner de Barros

INTRODUÇÃO	439
TRECHO EXPERIMENTAL	439
Localização	439
MATERIAIS	440
Distribuição Granulométrica	442
PROJETO DA MISTURA DO ASFALTO COM PLÁSTICO	442
EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL	443
Procedimento de Remoção das Camadas Asfálticas	443
Execução da Camada de Asfalto com Plástico	443
ANÁLISES ESTRUTURAIS E FUNCIONAIS	444
Análises Estruturais	444
Análises Funcionais	444
Avaliação do Índice de Gravidade Global (IGG)	444
Avaliação da Irregularidade	445
Avaliação da Afundamento de Trilha de Roda	446
CONSIDERAÇÕES FINAIS	447
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	448

DOI: 10.29327/1430212.49-61

AVALIAÇÃO DO USO DE GARRAFAS PET COMO AGREGADO PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RODOVIAS 449

Andressa Beatriz Almeida dos Santos, Wellington Lorrán Gaia Ferreira & Bruno Tiago Angelo da Silva

1 INTRODUÇÃO	450
2 REFERENCIAL TEÓRICO	450
3 MATERIAIS E MÉTODOS	451
3.1 Materiais	451
3.2 Métodos	452
3.2.1 Caracterização dos Agregados	452
3.2.2 Determinação da Taxa de Agregado e da Taxa de Ligante Asfáltico	453
3.2.3 Resistência ao Desgaste	453
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	455
4.1 Caracterização dos Agregados	455
4.1.1 Análise Granulométrica	455
4.1.2 Índice de Forma e Adesividade	455
4.1.3 Absorção e Abrasão Los Angeles	456
4.2 Avaliação do Desgaste	456
5 CONCLUSÕES	458
REFERÊNCIAS	459

DOI: 10.29327/1430212.49-58

ESTUDO DE CASO: UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA MANUTENÇÃO DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA NA MALHA DA 26ª UNIDADE REGIONAL DO DER/MG..... 460

Samuel Passos Ribeiro Rodrigues e Silva, Érica Francisca de Paula Araújo, Vinicius Vieira Sousa, Elziane Rezende Ferreira Magri

INTRODUÇÃO	461
REFERENCIAL TEÓRICO	462
METODOLOGIA	464
RESULTADOS	465
CONCLUSÃO	470
REFERÊNCIAS	470

DOI: 10.29327/1430212.49-22

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA SCHEELITA EM COMPOSIÇÕES ASFÁLTICAS 472

Francisco das Chagas da Costa Filho, Enio Fernandes Amorim, Maria Del Pilar Durante, David Cavalcante da Silva

INTRODUÇÃO	473
MATERIAIS E MÉTODOS	473
Características dos materiais envolvidos	473
Programa experimental	476
RESULTADOS E DISCUSSÕES	477
CONCLUSÕES	481
AGRADECIMENTOS	482
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	482

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA: CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE 484

Murilo Miguel Narciso, Lislely Madeira Coelho, Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

INTRODUÇÃO	485
MATERIAIS E MÉTODOS	485
Extrusão e Calcinação.....	486
Caracterização Física	487
Caracterização Mineralógica	488
Caracterização Das Amostras Da Argila Calcinada	489
RESULTADOS E DISCUSSÕES	489
Caracterização Do Solo Arenoso(A1)	489
Caracterização Do Rejeito(A2).....	490
Caracterização Do Solo Argiloso(A3)	491
Classificação de Winkler	492
Caracterização Do AAC Produzido	493
CONCLUSÕES	494
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	494

PRODUÇÃO DE PÓ DE VIDRO MOÍDO A PARTIR DE RESÍDUOS PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE INFRAESTUTURA 496

Lucas Eduardo Dornelles, Bethania Machado Correa

INTRODUÇÃO	497
METODOLOGIA	497
Pó de vidro	498
Solo Argiloso	500
Cal de carbureto	501
Programa experimental	501
Moldagem dos corpos de prova	502
Ensaio de compressão diametral	503
RESULTADOS E ANÁLISES	504
Resistência à tração por compressão diametral.....	504
Análise Estatística	506
CONSIDERAÇÕES FINAIS	506
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	507

DOI: 10.29327/1430212.49-47

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RAP NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA DE MISTURAS DO TIPO BSM ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA..... 508

Daniel Wolter Martell, Washington Peres Núñez, Lélío Antônio Teixeira Brito

INTRODUÇÃO	509
CONCEITUAÇÃO E ASPECTOS GERAIS DAS MISTURAS TIPO BSM	509
PROGRAMA EXPERIMENTAL	510
MATERIAIS	511
Materiais Procedentes da Coleta de Campo (RAP e BGS)	511
Cimento	511
Emulsão Asfáltica	512
MÉTODOS	512
Caracterização das Misturas (RAP + BGS + cimento + emulsão).....	512
Definição dos Teores de Emulsão Asfáltica Incorporados	513
Preparação e Compactação das Amostras	513
Cura Controlada das Amostras.....	513
Determinação da Resistência à Tração Indireta (ITS)	514
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	514
Caracterização das Misturas	514
Efeito da Incorporação de RAP na Resistência à Tração Indireta (ITS)	516
CONCLUSÕES	518
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	518

DOI: 10.29327/1430212.49-69

IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO 520

Igor Sieczkowski Moreira, Leonardo Lunkes Wagner, Mônica Regina Garcez, Gracieli Bordin Colpo & Lélío Antônio Teixeira Brito

INTRODUÇÃO	521
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	521
ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	523
Escopo	524
Construção do inventário	525
Avaliação dos Impactos	527
RESULTADOS E DISCUSSÃO	527
CONCLUSÕES	529
AGRADECIMENTOS	530
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	530

DOI: 10.29327/1430212.49-55

IMPACTOS AMBIENTAIS DA UTILIZAÇÃO LODO TÊXTIL EM CONCRETO ASFÁLTICO AO SER EXPOSTO A ÁGUA 532

Lyneker S. Moura, Carina L. Silva, Ana Cecília V. da Nóbrega & Arnaldo M. P. Carneiro

INTRODUÇÃO	533
MATERIAIS E MÉTODOS	534
Materiais	534
Metodologia	534
RESULTADOS E DISCUSSÃO	535
CONCLUSÕES	537
AGRADECIMENTOS	538
REFERÊNCIAS	538

REVISÃO ANALÍTICA SOBRE O POTENCIAL USO DO DIÓXIDO DE TITÂNIO NA PAVIMENTAÇÃO..... 540

Maria Ingridy Lacerda Diniz, Chrysttyn Thalles Ribeiro Felix, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, Talita Miranda de Sousa, Osires de Medeiros Melo Neto

INTRODUÇÃO	541
DIÓXIDO DE TITÂNIO.....	541
EFEITO FOTOCATALÍTICO DO DIÓXIDO DE TITÂNIO	542
APLICAÇÃO DE TiO₂ EM LIGANTES ASFÁLTICOS	543
APLICAÇÕES DE TiO₂ EM OUTROS SETORES DA INDÚSTRIA	545
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	545
REFERÊNCIAS	546

RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

AValiação de misturas asfálticas mornas com a incorporação de revestimentos asfálticos fresados 550

Jeovanesa Régis Carvalho, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, Rita Flávia Régis Queiroz, Yury Ouriques Rodrigues

INTRODUÇÃO	551
MATERIAIS E MÉTODOS.....	552
Ligante asfáltico	552
Agregados	553
Óleo de girassol	553
Aditivo químico	553
RAP	554
Dosagem das misturas asfálticas recicladas	555
Temperaturas de usinagem e compactação	556
Caracterização mecânica	557
RESULTADOS	557
Resistência à tração indireta por compressão diametral	557
Módulo de resiliência	558
Dano por umidade induzida	559
CONCLUSÃO	560
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	560

DOI: 10.29327/1430212.49-110

APLICAÇÃO DE MATERIAL ESTABILIZADO COM EMULSÃO ASFÁLTICA (BSM) PARA RECUPERAÇÃO PROFUNDA DE PAVIMENTOS: ESTUDO DE CASO DA BR-381/MG 562

Raimi Costa da Silva, Thiago Gomes Galdino Leite, Diogo Bento de Moraes, Guilherme Rodrigues Linhares,
Zila Maria Garcia Mascarenhas, Kamilla Vasconcelos Savasini, Celso Luiz dos Santo Romeiro Júnior, Mateus Wobeto

INTRODUÇÃO	563
CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO	563
ETAPAS EXECUTIVAS	563
Sondagens de pavimento	564
Projeto de mistura	565
Dimensionamento	565
Execução da obra	566
Controle e Verificação de Qualidade	567
PRINCIPAIS DESAFIOS	570
CONSIDERAÇÕES FINAIS	572
AGRADECIMENTOS	572
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	573

DOI: 10.29327/1430212.49-52

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO DOSADAS COM 100% DE RAP E EMULSÕES ASFÁLTICAS CONVECIONAL E MODIFICADA 574

Vitor Andrade Farias, Mario Sergio de Souza Almeida, Vitor Calmon Almeida, Paulo Ricardo Lemos de Santana,
Elane Donato Santos & Weiner Gustavo Silva Costa

INTRODUÇÃO	575
MATERIAIS E MÉTODOS	576
Caracterização do Agregado (RAP)	576
Especificação das Emulsões Asfálticas	578
Mistura para o Teor de Projeto	579
RESULTADOS E DISCUSSÃO	581
CONCLUSÃO	583
REFERÊNCIAS	584

DOI: 10.29327/1430212.49-111

PROPOSTA DE ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO IN SITU COM EMULSÃO ASFÁLTICA: ESTUDO DE CASO EM UMA VIA URBANA DE CURITIBA/PR 586

Douglas Antônio Thiel, Matheus David Inocente Domingos, Allan Monteiro Silva, Yan Gorski de Campos Malta,
Rafael Marçal Martins de Reis, Joel Silveira

INTRODUÇÃO	587
DOSAGEM DA MISTURA RECICLADA	588
EXECUÇÃO DA OBRA E ESTUDOS POSTERIORES	592
RESULTADOS ESPERADOS	594
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	594

DOI: 10.29327/1430212.49-21

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS EM MISTURAS DE RAP,
SOLO ARGILOSO E CIMENTO PORTLAND..... 596**

Guilherme Bravo de Oliveira Almeida, Helen Mariana Ribeiro Fontes, Lucila Costa Sales

INTRODUÇÃO	597
PROGRAMA LABORATORIAL	598
RESULTADOS E DISCUSSÃO	599
CONCLUSÃO.....	602
Agradecimentos.....	603
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	603

DOI: 10.29327/1430212.49-53

**AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS
SOLORAP PELO ENSAIO DE MULTIESTÁGIOS..... 605**

Isabela de Jesus Santos, Mario Sergio de Souza Almeida, Acbal Rucas Andrade Achy, Weiner Gustavo Silva Costa,
Mateus Ribeiro Caetano & Gisandra Faria de Paula

INTRODUÇÃO	606
MATERIAIS E MÉTODOS	607
Local de coleta e caracterização geotécnica das amostras	607
Deformação Permanente Multiestágio (RLT)	608
RESULTADOS E DISCUSSÕES	609
Caracterização das amostras	609
Deformação Permanente	611
Teoria <i>Shakedown</i>	612
CONSIDERAÇÕES FINAIS	614
AGRADECIMENTOS	614
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	614

DOI: 10.29327/1430212.49-39

**O USO DO RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO (RPA)
NA ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS GEOTÉCNICAS DE PAVIMENTOS 616**

João Paulo Arruda Sewaybricker & Caroline Dias Amancio de Lima

INTRODUÇÃO	617
INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES RODOVIÁRIO NO BRASIL	617
Custos Associados às Obras de Pavimentação.....	618
EXPERIÊNCIA AMERICANA COM O USO DO RPA.....	619
A RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	620
Extração e Transporte do Material	620
Técnicas para Reciclagem de Pavimentos	621
ESTUDOS REALIZADOS COM RPA PARA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA	622
Misturas Solo-RPA.....	622
Misturas RPA-AV e RPA-AR	623
Misturas com Aditivo Químico	624
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	625
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	626

SEGURANÇA VIÁRIA E GESTÃO DE RISCO EM RODOVIAS

DOI: 10.29327/1430212.49-83

ESTUDO DE CASO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA ÁREA DE ESCAPE NA CURVA DA FERRADURA DA RODOVIA PR-170, EM PINHÃO/PR 630

Eleandro Campos Pereira, Fernando Furiatti Saboia, Alexandre Castro Fernandes, Lorena Nadine Baran, Thais Mazzure Pedroso, Luis Felipe Carraro, Geovane Cardoso de Almeida

INTRODUÇÃO	631
ABRANGÊNCIA DO ESTUDO DE UMA ÁREA DE ESCAPE	632
Caixa de retenção	632
Faixa auxiliar	633
Drenagem	633
Sinalização.....	633
PARÂMETROS ANALISADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DE ESCAPE	634
Áreas de escape no Brasil	636
ESTUDO DE CASO NA RODOVIA PR-170 EM PINHÃO/PR	637
RESULTADOS	639
CONSIDERAÇÕES FINAIS	640
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	641

DOI: 10.29327/1430212.49-82

ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ROCHOSO NA MG-120, KM 147, POR MEIO DE TELA METÁLICA E CHUMBADORES SISTEMÁTICOS: ESTUDO DE CASO 642

Rosemberg Ferreira Nunes, Flávia Lima Costa, Dionisio Tadeu de Azevedo, Camila Hilário Bethonico & Roberto Navarro de Castro

INTRODUÇÃO	643
ESTUDO DE CASO	643
Metodologia	643
Inspeções de campo e avaliação geotécnica do talude.....	643
Mapeamento Geológico-Geotécnico das Fraturas	644
Resumo dos Problemas.....	645
ANÁLISES DA ESTABILIDADE DO TALUDE	646
PROJETO DE ESTABILIZAÇÃO E PROTEÇÃO	647
Estabilização do Talude – Tela Metálica e Chumbadores Sistemáticos	648
Dados de Entrada no Software MACRO 1	648
Dimensionamento dos chumbadores	650
Fatores de Segurança adquiridos e resumo do sistema de estabilização proposto.....	652
CONCLUSÕES	653
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	653

DOI: 10.29327/1430212.49-88

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM MACIÇO ROCHOSO EM TRECHOS DAS RODOVIAS PE-160 E BR-104 COM ÊNFASE DA SEGURANÇA VIÁRIA..... 654

Shirley Minnell Ferreira de Oliveira, Tallys Celso Mineiro

INTRODUÇÃO	655
METODOLOGIA	656
RESULTADOS E DISCUSSÃO	660
CONCLUSÕES	664
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	665

DOI: 10.29327/1430212.49-81

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA TIPO SMA COM ÊNFASE NO PARÂMETRO PNEU-PAVIMENTO - ESTUDO DE CASO NA AVENIDA DO CONTORNO EM BELO HORIZONTE/MG BRASIL 666

Bernardo de Brito Pereira, Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli, Marcelo Franco Porto, Ronderson Queiroz Hilário

INTRODUÇÃO	667
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	667
Aderência Pneu-Pavimento.....	667
Relação Entre Variáveis	669
MATERIAIS E MÉTODOS	669
Metodologia ADSR	669
Questionário de Validação	670
DESENVOLVIMENTO	670
Trecho de Estudo	670
Implantação do Revestimento Tipo SMA.....	670
Ensaio de Macrot textura e Microtextura	671
Sinistros de Trânsito no Segmento da Pesquisa	673
Evolução – Questionário Aplicado aos Motoristas de Coletivos Urbano	674
CONSIDERAÇÕES	675
AGRADECIMENTOS	676
ACKNOWLEDGMENT	676
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	676

DOI: 10.29327/1430212.49-86

INVESTIGAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A PRESENÇA DE BURACOS E O PADRÃO DE CONDUÇÃO VEICULAR..... 678

Alison kaio Dantas Pereira, Thiago de Jesus de Souza & Wellington Lorrán Gaia Ferreira

1. INTRODUÇÃO	679
2. MATERIAL E MÉTODOS	680
2.1. Área de Estudo	680
2.2. Coleta do Padrão de Condução	682
3. RESULTADOS	682
3.1. Influência do Tamanho do Buraco no Padrão de Condução Veicular	682
3.2. Influência da Posição do Buraco no Padrão de Condução Veicular	684
3.3. Influência do Buraco na Trajetória do Veículo	685
4. CONCLUSÕES	688
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	688

**INTRODUÇÃO À INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA
DETECÇÃO E MAPEAMENTO DE SINALIZAÇÃO VIÁRIA..... 690**

Leticia Barros, Carlos Ivan, Thiago Dantas, Mariana Prysthon

INTRODUÇÃO	691
METODOLOGIA	692
Área de estudo.....	692
Desenvolvimento do sistema de inteligência artificial	693
Planejamento e Treinamento	694
Aplicação do modelo	694
RESULTADOS	696
CONCLUSÃO	698
AGRADECIMENTOS	698
REFERÊNCIAS	698

**UM ESTUDO DE CASO SOBRE SINISTROS DE TRÂNSITO NA
RODOVIA BR-277/PR E AS AÇÕES PREVISTAS NOS PROGRAMAS DE
CONCESSÃO RODOVIÁRIA PARA MELHORIA DA SEGURANÇA VIÁRIA..... 700**

Patrícia Pacheco Bertozzi

INTRODUÇÃO	701
OS PROGRAMAS DE CONCESSÃO DE RODOVIAS NO ESTADO DO PARANÁ	704
O Programa de Concessão Rodoviária Anel de Integração do Paraná.....	704
O Programa de Concessão Rodoviária Rodovias Integradas do Paraná	705
A ABORDAGEM DE SEGURANÇA VIÁRIA NOS PROGRAMAS DE CONCESSÃO DE RODOVIAS NO ESTADO DO PARANÁ	706
Os sinistros de trânsito na BR-277 entre 2018 e 2023.....	706
O enfoque da segurança viária no Programa de Concessão Anel de Integração do Paraná	707
O enfoque da segurança viária no Programa de Concessão Rodovias Integradas do Paraná	708
COMENTÁRIOS FINAIS	710
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	710

ANÁLISE DE ACIDENTALIDADE NAS RODOVIAS SOB ADMINISTRAÇÃO DO DER/SP UTILIZANDO MAPAS DE CALOR..... 712

Carolina Iris Brasil Mariano, Rafael Grinberg Chasles, Fabiana Gurkas Brunoro, José Luiz Fuzaro Rodrigues, Gean Kenid Sifronio Franco, Vinicius do Prado Capanema, Bruna Donegá Alves & Anderson Barbosa Esteves

INTRODUÇÃO	713
MATERIAIS E MÉTODOS.....	713
Coleta de Dados	713
Área de Análise	714
Dados de Acidentes	715
Método de Espacialização dos Pontos dos Acidentes	716
RESULTADOS	718
Acidentes total	718
Acidentes por tipo – exemplo: colisão frontal	718
Acidentes com vítimas fatais	719
Unidades Padrão de Severidade – UPS	720
Próximo Passo do DER/SP em Relação à Segurança Viária	721
Estudos Futuros	722
CONCLUSÃO	722
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	722

IDENTIFICAÇÃO DE TRECHO RODOVIÁRIO COM ALTO ÍNDICE DE ACIDENTES E PROPOSTA DE SOLUÇÕES – ESTUDO DE CASO 724

Victor Paiva & Maria Rachel de Araújo Russo

1. INTRODUÇÃO	725
2. MÉTODO	725
Conhecimento de um Trecho Crítico	726
3. RESULTADOS E ANÁLISE	727
Definição do Trecho	727
Caracterização do Trecho	729
Análise do Trecho	731
Inconformidades no projeto geométrico	731
Interseções inadequadas	733
Proposta de Soluções e Comparação com o Trecho Atual	733
4. CONCLUSÃO	735
REFERÊNCIAS	735

TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO, RESTAURAÇÃO E CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS

DOI: 10.29327/1430212.49-37

METODOLOGIA INTEGRADA PARA IMPUTAÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS RODOVIÁRIOS: COMBINAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO..... 739

Diego Vieira de Souza, Mariana Gonçalves da Silva, Brunna Mikaelli Pinho da Silva, Francisco Junior Peixoto Dantas,
Antonio Junior Alves Ribeiro & Suelly Helena de Araújo Barroso

INTRODUÇÃO	740
METODOLOGIA.....	741
RESULTADOS E DISCUSSÃO	744
CONCLUSÃO.....	748
REFERÊNCIAS	749
AGRADECIMENTOS	750

DOI: 10.29327/1430212.49-106

AValiação DA QUALIDADE DA MANUTENÇÃO DO TRECHO DA BR101/NORTE NO ESTADO DE SERGIPE EMPREGANDO O ÍNDICE DE QUALIDADE DA MANUTENÇÃO (IQM): ESTUDO DE CASO..... 751

Stéfanny Bruna Oliveira Andrade & Andrea Santana Teixeira Lins

INTRODUÇÃO	752
METODOLOGIA	753
Área de Estudo	753
Indicador de Qualidade das Rodovias Federais (ICM)	754
Critérios de Avaliação para Análise	754
Adoção dos Critérios de Pavimentação para o Cálculo do IQM	755
Adoção dos Critérios de Conservação para o Cálculo do IQM	755
Cálculo do ICM	756
Cálculo do IQM	756
Descrição do Processo	758
ANÁLISE DOS RESULTADOS	758
Análise Comparativa entre ICM e IQM no Mês de Outubro	758
Análise Comparativa entre ICM e IQM no Mês de Novembro	759
Análise Comparativa entre ICM e IQM no Mês de Dezembro	760
CONCLUSÃO	761
AGRADECIMENTOS	762
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	762

CONSERVA PRO: NOVAS ABORDAGENS DOS CONTRATOS DE MANUTENÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA DO DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS – DER/MG 763

Diogo Mendes Cardinali Pinheiro, Gibran Alvim Lacerda, Ivan Elídio de Pinho Tavares, Marcelo dos Santos Rodrigues, Marcelo José Cândido Rocha & Raul Coelho de Sousa

INTRODUÇÃO	764
APRESENTAÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA ESTADUAL	764
A DEFINIÇÃO DOS CONCEITOS DE MANUTENÇÃO E CONSERVAÇÃO	764
Conservação Corretiva Rotineira	765
Conservação Preventiva Periódica	765
Conservação de Emergência.....	765
Restauração	765
Melhoramentos	765
Recuperação de Pavimentos	766
Restauração de Pavimentos	766
Reabilitação de Pavimentos	766
EXPERIÊNCIAS NA MANUTENÇÃO DA MALHA ESTADUAL RODOVIÁRIA DO DER/MG	766
Manutenção por Execução Direta	766
Serviços por demanda (unitário)	767
Serviços de conservação por quilometro (km)	767
CONSERVA PRO	767
Serviços por demanda (unitário) no Conserva Pro	768
Serviços de conservação por quilometro (km) no Conserva Pro	769
Componente de reparo dos pavimentos no Conserva Pro	771
QUESTÕES JURÍDICAS E OUTROS DESAFIOS	771
CONCLUSÃO	771
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	772

MELHORIAS SUPERFICIAIS EM ESTRADAS DE TERRA 773

Thayse Balarotti Pedrazzi, Cassio Eduardo Lima de Paiva, Amaro Gabriel Joaquim

INTRODUÇÃO	774
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	775
PROGRAMA EXPERIMENTAL	776
RESULTADOS	778
CONCLUSÃO	781
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	783

INFLUÊNCIA DAS CHUVAS NA IMPRODUTIVIDADE DE OBRAS DE TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO NA CIDADE DE ARACAJU/SE 785

Flavia Santos Cardoso & Zacarias Caetano Vieira

INTRODUÇÃO	786
OBJETIVOS	788
METODOLOGIA	788
Área de estudo	788
Metodologia	788
Dados de precipitação	788
Critérios de Corte de Dias Úteis com Base nas Chuvas	789
RESULTADOS E DISCUSSÕES	790
Dias úteis do ano de 2024	790
Improdutividades de cada mês	790
Dias úteis trabalháveis e dias úteis improdutivos	791
CONCLUSÃO	793
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	793

GLASS FIBRE GRID REINFORCED BITUMINOUS PAVEMENTS – FIELD STUDY 795

Abhijith B.S, Stepan Bohus, Kavitha G, Atul Narayan S P & Veeraragavan A

INTRODUCTION	796
MATERIALS AND METHODS	797
PAVEMENT FUNCTIONAL AND STRUCTURAL CONDITION	799
Alligator Cracks	799
Crack Investigation on Extracted Cores	800
Pavement Condition Index (PCI)	801
Deflection Bowl Study	801
DATA GROUPING USING CLUSTERING TECHNIQUES	803
CONCLUSION	804
REFERENCES	806

CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADOS EM PAVIMENTAÇÃO DE VIA URBANA EM CIDADE NO INTERIOR DO CEARÁ 807

Mariana de Araújo Leite, Silvio Rocha Ferreira Neto, Lucas Cavalcante de Almeida, José Wémenson Rabelo Chaves & Francisco Heber Lacerda de Oliveira

INTRODUÇÃO	808
MÉTODO DE PESQUISA	808
Considerações Sobre a Pesquisa Bibliográfica	809
Etapas do Processo de Investigação	809
RESULTADOS E DISCUSSÕES	811
Descrição do objeto de estudo: rua em cidade do interior do Ceará	811
Análise Técnica dos Materiais Utilizados na Obra	812
Análise Técnica da Entrega e Armazenamento do Material	813
Análise Técnica do Assentamento das Contenções Laterais	813
Análise Técnica da Execução das Camadas de Sub-base, Base e Assentamento	814
Análise Técnica do Assentamento dos Blocos de Concreto Intertravados	814
Análise Técnica dos Ajustes e Arremates	815
Análise Técnica da Execução da Camada de Rejuntamento e da Compactação	815
Análise Técnica da Inspeção Final e preenchimento do Checklist do Trecho Analisado	816
CONCLUSÕES	818
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	818

INOVADORA VERSÃO DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO IMPREGNADO COM ASFALTO COMO CAMADA INTERMEDIÁRIA IMPERMEÁVEL E REDUTORA DA REFLEXÃO DAS TRINCAS 819

Guillermo Montestruque, Gustavo Castro da Silva, João Marcos Almeida Fernandes, Joaquim Rodrigues Gomes Neto & Breno Richard da Silva

1 INTRODUÇÃO	820
2 MATERIAIS	821
2.1 O Geossintético Geotêxtil	821
2.2 Emulsão Asfáltica	821
2.3 Camada Porosa de Atrito	822
3 METODOLOGIA	822
3.1 Impregnações dos Geotêxteis	822
3.2 Ensaio de estanqueidade do geotêxtil impregnado com asfalto	823
3.3 Ensaio de estanqueidade do geotêxtil impregnado com asfalto em corpos de prova prismáticos de CPA	825
3.4 Ensaio de estanqueidade no corpo de prova prismáticos sem e com o geotêxtil impregnado com asfalto	826
3.5 Ensaio de aderência em corpos de prova cilíndrico sem e com o geotêxtil impregnado com asfalto	828
4 CONCLUSÕES	829
COMENTÁRIOS FINAIS	830
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	830
AGRADECIMENTOS	830

**ADEQUAÇÃO DA NORMA BRASILEIRA PRO-011
EM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS..... 831**

Alejandro Anguiano Acquart, Edwin Fernando Ruiz Blanco, Esther Pozo Caro

CONTEXTO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	832
METODOLOGIA DESENVOLVIDA	833
VALIDAÇÃO E ESCOPO DE APLICAÇÃO	838
CONCLUSÕES	838
REFERENCIAS	838

**REMODELAGEM E ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE GERÊNCIA
DE PAVIMENTOS DO DNIT (SGP-DNIT)..... 840**

Mateus Aguiar Lima, Karina Soares da Costa e Oliveira, Vinicius Quintiliano Pereira, Leonardo Fabri de Moraes,
Cintia Adriana Azevedo de Liz Anhaia, Régis Martins Rodrigues & Luiz Guilherme Rodrigues de Mello

1 INTRODUÇÃO	841
2 REFERENCIAL TEÓRICO	841
3 IMPORTAÇÃO DE DADOS	843
4 ANÁLISES DO SGP	845
4.1 Retroanálise de bacias	846
4.2 Modelos de Previsão de Desempenho	846
4.3 Árvores de Decisão	846
4.4 Simulação de Cenários de Investimentos	847
5 RESULTADOS	847
5.1 Consulta de Dados de Condição	847
5.2 Retroanálise de Bacias de Deflexão	848
5.3 Recalibração de Modelos de Previsão de Desempenho	849
5.4 Diagnóstico e Necessidades Atuais de Manutenção	849
5.5 Planos Plurianuais de Investimento	850
6 CONCLUSÃO	851
7 REFERÊNCIAS	851

DOI: 10.29327/1430212.49-98

**PROPOSTA DE PARÂMETROS DE PAVIMENTAÇÃO PARA
RODOVIAS FEDERAIS CONCEDIDAS: ESTUDO E FUNDAMENTAÇÃO 852**

Thiago Douglas Alvarenga Camelo, Arilena Covalesky Dias, Laynara Xavier Barroso

INTRODUÇÃO	853
ESTUDO DE CASO	854
RESULTADOS E DISCUSSÕES	858
CONCLUSÃO	862
REFERÊNCIAS	863

DOI: 10.29327/1430212.49-76

**MACROSSIMULAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE ESTIMATIVA DE VMDA
NA MALHA RODOVIÁRIA DE MINAS GERAIS 864**

Anna Bárbara Fonseca Duarte, Thais Berger Barbosa da Silva, Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli

INTRODUÇÃO	865
MÉTODO	866
Coleta e Tratamento dos Dados	866
Construção do modelo de simulação	869
Próximas etapas do método.....	872
RESULTADOS	873
CONCLUSÃO	874
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	875

DOI: 10.29327/1430212.49-109

**ESTUDO DE CASO DA CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA E MANUTENÇÃO
DA RODOVIA BR-122: TRECHO QUIXADÁ-BANABUIÚ 876**

Joázy Sousa Lopes

INTRODUÇÃO	877
CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DO SEGMENTO	877
CONCLUSÃO	884
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	885

GESTÃO E MELHORIA NA INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA: PARÂMETROS, MODELAGEM E PROCEDIMENTOS

DOI: 10.29327/1430212.49-79

ANÁLISE COMPARATIVA DE SOFTWARES DE MODELAGEM DE TRÁFEGO APLICADO EM AMBIENTE URBANO 888

Marcelo Franco Porto, Cleide Maria Martins, Rafael Augusto Santos de Souza, Marina Vasconcelos de Paula e Silva,
Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli

1 INTRODUÇÃO	889
2 SIMULADORES DE TRÁFEGO	890
2.1 Características dos Simuladores	890
2.1.1 Aimsun	890
2.1.2 PTV Vissim	891
2.1.3 Autodesk InfraWorks	891
3.0 METODOLOGIA	891
4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS SOFTWARES	894
4.2 Simulação no PTV Vissim, no Aimsun e no Autodesk InfraWorks	895
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	898
6 AGRADECIMENTOS	898
7 REFERÊNCIAS	898

DOI: 10.29327/1430212.49-77

ESTUDO DE CASO ANTEPROJETO X CONTRATAÇÃO INTEGRADA – INTERSEÇÃO EM DESNÍVEL NA RODOVIA BR-376/PR, CRUZAMENTO COM PR-317, EM MARINGÁ/PR..... 900

Aline Viana Pereira, Victor Eduardo Antunes, Darlan Paiva Santana & Carlos Guilherme Pittarello dos Santos

INTRODUÇÃO	901
TIPOS DE CONTRATAÇÕES DE ACORDO COM A NOVA LEI	901
INOVAÇÃO NA MODALIDADE DE LICITAÇÃO	902
VANTAGEM PARA O ÓRGÃO PÚBLICO NA CONTRATAÇÃO INTEGRADA: IMPOSSIBILIDADE DE ADITIVAR VALOR	903
METODOLOGIA	904
RESULTADOS	905
CONSIDERAÇÕES FINAIS	911

DOI: 10.29327/1430212.49-80

PROPOSTAS DE MELHORIAS PARA REMUNERAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE TRÁFEGO EM OBRAS RODOVIÁRIAS..... 912

Pedro Igor de Araújo Rêgo, Sandra Patricia Echeverria Fernandez, Renan Abreu de Moura & Caio Saravy Cardoso

INTRODUÇÃO	913
REFERENCIAL TEÓRICO	913
Bibliografia internacional acerca da interferência de tráfego em obras de engenharia	913
Conceitos viários	915
Conceitos de custos	915
Metodologia atual	918
MÉTODO	919
RESULTADOS E DISCUSSÕES	922
CONSIDERAÇÕES FINAIS	922
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	922

**PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA PERÍCIA NAS
DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE SEM OBRAS RODOVIÁRIAS..... 924**

João Paulo Ferreira de Lacerda, Benaffe Santos Cardoso de Almeida, Flávio Santos Sousa Costa,
Antonio Júnior Alves Ribeiro & Suelly Helena de Araújo Barroso

INTRODUÇÃO	925
REFERENCIAL TEÓRICO	925
Geoprocessamento na avaliação das DMTs.....	926
Orçamento de Obras Públicas.....	926
MATERIAIS E MÉTODOS.....	927
RESULTADOS E DISCUSSÃO	928
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	934
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	934

**MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO
LIGANTES ASFÁLTICOS, SOLOS E AGREGADOS**

**SELEÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR DESEMPENHO
CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA..... 938**

Victória Nunes Ramos, Luciano Pivoto Specht, Silvio Lisboa Schuster, Luiz Guilherme Rodrigues de Mello,
Luiz Heleno Albuquerque Filho

INTRODUÇÃO	939
MATERIAIS E MÉTODOS.....	940
Planejamento da Pesquisa.....	940
Materiais utilizados.....	940
Caracterização convencional de ligantes asfálticos.....	940
Caracterização linear viscoelástica de ligantes asfálticos (LVE).....	941
Caracterização do dano em ligantes asfálticos	941
Parâmetros-alvo de dano em misturas asfálticas	942
RESULTADOS E DISCUSSÃO	943
Definição do indicador de deformação permanente	943
Definição do indicador de fadiga.....	944
Classificação geral de ligantes asfálticos	944
CONCLUSÕES	947
AGRADECIMENTOS	948
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	948

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO OTIMIZADO DE CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES A PARTIR DE SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS..... 950

Bruno Cavalcante Mota, Mariluce de Oliveira Ubaldo, Francisco Thiago Sacramento Aragão & Luis Alberto Herrmann do Nascimento

INTRODUÇÃO	951
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	952
MÉTODO DE PESQUISA	953
O modelo otimizado de DP.....	953
Avaliação mecanístico-empírica do ATR.....	954
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	955
Construção das curvas mestras	955
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	959
AGRADECIMENTOS	960
REFERÊNCIAS	960

COMPORTAMENTO RESILIENTE DE BRITA GRADUADA SIMPLES DE UM TRECHO DA RODOVIA BR-116/RS..... 962

Beatriz Oliveira de Sousa Silva, Lislely Madeira Coelho, Jonathan de Oliveira Guimarães, Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

INTRODUÇÃO	963
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	963
Pavimento Rodoviário e Mecânica dos Pavimentos	963
Módulo de Resiliência	963
MATERIAIS E MÉTODOS.....	965
Área de Estudo	965
Caracterização Física	966
Ensaio Mecânicos	966
Etapa de Modelagem.....	967
Cálculo dos Modelos para Avaliação do Módulo de Resiliência	967
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	967
Caracterização Física	967
Ensaio de Módulo de Resiliência	968
CONCLUSÃO.....	972
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	973

DOI: 10.29327/1430212.49-48

INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE TRÊS MATERIAIS GRANULARES NÃO LATERÍTICOS 974

Nádgyla Layana Tófolo Silva, Raquel Silva Ramos, Jaime Pinheiro Campos Sobrinho, Lucas Araújo da Silva, Mário Sérgio de Souza Almeida & Weiner Gustavo Silva Costa

INTRODUÇÃO	975
MATERIAL E MÉTODOS	975
Caracterização dos Solos	976
Classificação pela Metodologia MCT e G-MCT	976
Preparação e Compactação dos Materiais	977
Ensaio de Módulo de Resiliência	977
Análise Mecanicista de um Pavimento de Referência	978
RESULTADOS E DISCUSSÃO	980
Caracterização dos Solos	980
Classificação do solo por MCT e G-MCT	980
Módulo de Resiliência	981
Estimativa de vida útil do pavimento de referência.....	983
CONSIDERAÇÕES FINAIS	984
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	984

DOI: 10.29327/1430212.49-49

COMPORTAMENTO RESILIENTE DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO PAVIMENTO DO AEROPORTO DE DOURADOS/MS 986

Camila Antunes Martins, Luisa Carla de Alencar Menezes, Ana Carolina Duarte Bona, Priscila Oliveira Folly, Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

INTRODUÇÃO.....	986
PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO	987
Módulo de Resiliência	988
MATERIAIS E MÉTODOS.....	989
RESULTADOS E DISCUSSÕES	992
CONSIDERAÇÕES FINAIS	994
Agradecimentos.....	994
REFERÊNCIAS	994

DOI: 10.29327/1430212.49-46

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO ESPERADO DE SOLOS TROPICAIS DE GRANULOMETRIA TRANSICIONAL..... 996

Rafael Lopes Witiuk, Maria Esther Soares Marques, Antonio Carlos Rodrigues Guimarães

INTRODUÇÃO	996
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	997
Classificação de solos tropicais	997
Seleção de materiais para pavimentação	998
MATERIAIS E METODOS	999
Apresentação da região do estudo de caso.....	999
Ensaio geotécnicos realizados.....	1000
RESULTADOS E DISCUSSÃO	1001
CONCLUSÃO.....	1004
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1004

TRINCAS NA SUB-BASE EM UM SOLO DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO

ESTUDO DE CASO 1006

Caio Vinicius Lemos Melo dos Santos, Guilherme Bravo de Oliveira Almeida & Joelson Hora Costa

INTRODUÇÃO	1007
Breve Abordagem da Classificação MCT	1007
Caracterização do Estudo de Caso	1009
PROGRAMA EXPERIMENTAL	1009
RESULTADOS E DISCUSSÃO	1010
Verificação das Operações em Campo	1013
CONSIDERAÇÕES FINAIS	1015
Agradecimento	1016
REFERÊNCIAS	1016

UTILIZAÇÃO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA ANÁLISE DOS PARÂMETROS

GEOTÉCNICOS DOS SOLOS TROPICAIS E PREDIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO MCT 1018

Whilson M. Mendonça, Felício G. Oliveira, Geraldo L. O. Marques, Diogo R. S. Baudson,
Marco Antônio G. Antunes & Gustavo F. Teixeira

INTRODUÇÃO	1019
MATERIAIS E MÉTODOS	1020
Materiais.....	1020
Métodos.....	1021
Ensaio de Laboratório (2ª etapa)	1021
Análises de Estatística Multivariada (3ª etapa)	1022
RESULTADOS E DISCUSSÕES	1022
Resultados dos Ensaio Geotécnicos e Banco de Dados	1022
Análises Estatísticas	1024
CONCLUSÕES	1028
AGRADECIMENTOS	1029
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1029

ESTABILIZAÇÃO DE MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO

DOI: 10.29327/1430212.49-36

ANÁLISE DO ESTABILIZANTE DYNABASE® PARA REAPROVEITAMENTO DE SOLO LOCAL – UM ESTUDO DE CASO APLICADO AO SISTEMA VIÁRIO DE UM SHOPPING CENTER NO MUNICÍPIO DE LAGARTO/SE..... 1032

Tayná Macêdo Rito de Santana, Levy Pablo Silva Garcia, José Victor Rodrigues Pinto, Franklin José Rodrigues Amorim, Joelson hora Costa, Victor Manuel de Queiroz Lourenço & Camilla Maria Torres Pinto

INTRODUÇÃO	1033
REFERENCIAL TEÓRICO	1033
MATERIAIS E MÉTODOS	1034
Solo e local de estudo	1034
Estabilizante	1035
Preparação e caracterização dos materiais	1036
RESULTADOS E DISCUSSÕES	1037
CONCLUSÕES	1040
REFERÊNCIAS	1041

DOI: 10.29327/1430212.49-24

AValiação DO FOSFOGESSO DE UBERABA COMO ESTABILIZAÇÃO DE SOLO 1044

Walter Contabile Martins, Amanda Jakelline Dias Araújo, Gustavo Dalto

INTRODUÇÃO	1045
MATERIAIS E MÉTODOS.....	1046
RESULTADOS E DISCUSSÃO	1050
CONCLUSÃO.....	1054
REFERÊNCIAS	1054

DOI: 10.29327/1430212.49-26

ESTUDO DA VARIAÇÃO DO PH AO LONGO DO TEMPO EM DOIS SOLOS DO DISTRITO FEDERAL MELHORADOS COM CAL..... 1056

Paulo Costa Fernandes, Gisandra Faria de Paula, Dan Imbroisi Brant Teixeira, Rafael Cerqueira Silva

INTRODUÇÃO	1057
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1057
DADOS DO ESTUDO.....	1060
Solos Estudados	1060
Ensaio da Variação do pH em H ₂ O e em KCl com o Tempo	1060
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	1062
CONCLUSÕES	1064
AGRADECIMENTOS	1065
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1065

MELHORIA DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS A PARTIR DA TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS COM FIBRAS NATURAIS DE AÇAÍ E COCO..... 1067

Mayara Luana de Jesus Santos, Michéle Dal Toé Casagrande

INTRODUÇÃO	1068
MATERIAIS E MÉTODOS	1069
Solo Argiloso Laterítico Utilizado na Análise	1070
Fibras de açaí estudadas	1070
Fibras de coco estudadas.....	1071
Métodos	1072
RESULTADOS	1072
Ensaio de Compactação	1072
Ensaio de Compressão Simples	1073
Ensaio de Tração Direta nas Fibras	1075
CONCLUSÃO	1075
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1075

ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA TRAÇÃO A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BGTC 1077

Verônica Janaína Melo Barreto Nunes, Fernando Silva Albuquerque

CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1078
PARÂMETROS MECÂNICOS	1079
Resistência à Compressão Simples	1079
Resistência à tração	1079
Rigidez	1080
MATERIAIS E MÉTODOS	1080
Materiais	1080
Dosagem	1081
Ensaio Mecânicos	1082
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	1083
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	1086
AGRADECIMENTOS	1087
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1087

DOI: 10.29327/1430212.49-34

**AVALIAÇÃO MECÂNICA DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO
CONTENDO FIBRA DE POLIPROPILENO MULTIFILAMENTO..... 1089**

Helen Mariana Ribeiro Fontes, Fernando Silva Albuquerque

INTRODUÇÃO	1090
MATERIAIS E MÉTODOS	1091
Materiais estudados	1091
Determinação do teor de fibras	1093
RESULTADOS E DISCUSSÃO	1095
CONCLUSÃO.....	1099
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1099

DOI: 10.29327/1430212.49-27

**INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRA DE POLIPROPILENO NO
DESEMPENHO MECÂNICO DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO 1101**

Felipe Simões Bacelar & Fernando Silva Albuquerque

INTRODUÇÃO	1102
REFERENCIAL TEÓRICO	1102
MATERIAIS E MÉTODOS.....	1103
Materiais utilizados no compósito BGTC e fibras.....	1103
Avaliações realizadas às misturas.....	1105
Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Elasticidade (E).....	1106
Ensaio de Resistência à Tração na Flexão (RTf) e Tenacidade na Tração na Flexão (TTF)	1107
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	1108
CONCLUSÕES	1111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1111

DOI: 10.29327/1430212.49-50

**ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO USO DA FIBRA DE PVA EM PAVIMENTO
DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND..... 1113**

Valeria Cristina de Faria, Artur Teixeira Herculano, Claudia Azevedo Pereira, Rodrigo Maziero Folgado, Eriadi Sumodjo

INTRODUÇÃO	1114
MATERIAIS E MÉTODOS	1115
DADOS DA CONCRETAGEM	1118
CONCLUSÃO.....	1122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1123

INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA E SUSTENTABILIDADE: MONITORAMENTO, RESILIÊNCIA E IMPACTOS CLIMÁTICOS

DOI: 10.29327/1430212.49-17

ANÁLISE DE DADOS REFERENTES AO CRESCIMENTO DE VEGETAÇÃO PARA DEFINIÇÃO DE SERVIÇO DE ROÇADA 1127

Gabriela Gomes de Carvalho Medrado, Fábio de Souza, Kleber Deleon de Oliveira

INTRODUÇÃO	1128
METODOLOGIA.....	1128
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	1130
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	1134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1135

DOI: 10.29327/1430212.49-16

“APLICAÇÃO DE GEORREFERENCIAMENTO EM DESAPROPRIAÇÕES E GERENCIAMENTO DE FAIXAS DE DOMÍNIO NO DER/DF: EFICIÊNCIA E SEGURANÇA VIÁRIA” 1136

Jesus Mauro Vieira de Oliveira, Andrea Amaziles Lousada, Bruno Maia Soriano Lousada, Caroline Chahini Ribeiro,
Janduhy Pereira dos Santos, Maurício Theodósio Mattos Marques & Ricardo Sameshima Taba

INTRODUÇÃO	1138
1. FAIXAS DE DOMÍNIO: DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA	1138
1.1 Área não edificável.....	1139
1.2 Faixas de Domínio no âmbito do Distrito Federal	1139
1.3 Principais Legislações sobre Faixas de Domínio no Distrito Federal	1140
2. DESAPROPRIAÇÃO: PROCESSO E JUSTIFICATIVA	1141
2.1 Limitação administrativa da desapropriação.....	1142
2.2 Processo de desapropriação	1142
3. GEORREFERENCIAMENTO DAS FAIXAS DE DOMÍNIO	1144
3.1 Tecnologia para gestão eficiente	1144
3.1 Administração e Fiscalização das Faixas de Domínio	1144
3.2 As atividades da Gerência de Geoinformação do DER/DF em Faixas de Domínio	1145
CONCLUSÃO.....	1146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1147

DOI: 10.29327/1430212.49-65

**MONITORAMENTO DA MASTOFAUNA:
UMA FERRAMENTA AUXILIAR PARA TOMADA DE DECISÕES
VISANDO A IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO EM RODOVIAS 1148**

Lucas Adriano Pachla, Rachel Cristina Talin Rua, Alexandra Lemos, Luiz Carlos de Lima Leite & Josani Carbonera Pereira

INTRODUÇÃO	1149
METODOLOGIA	1150
Área De Estudo.....	1150
Coleta Dos Dados	1151
Análise Dos Dados	1151
RESULTADOS E DISCUSSÃO	1152
CONCLUSÃO	1157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1157

DOI: 10.29327/1430212.49-68

**SENSORIAMENTO REMOTO COMO SUPORTE À DEFINIÇÃO
DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS 1159**

Alline Gomes Lamenha e Silva, Mônica Regina Garcez, Cecília Fortes Merighi, Gracieli Bordin Colpo & Lélío Antônio Teixeira Brito

INTRODUÇÃO	1160
REVISÃO BIBLOGRAFICA	1160
METODOLOGIA	1161
RESULTADOS E DISCUSSÕES	1163
CONCLUSÕES	1167
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1168

DOI: 10.29327/1430212.49-59

**DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO COMO ESTRATÉGIA DE GOVERNANÇA
DE DADOS NO SETOR DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA NO BRASIL 1170**

Mônica Regina Garcez, Cecília Fortes Merighi, Susan Mayumi Palu, Gracieli Bordin Colpo,
Luiz Manoel Souza & Lélío Antônio Teixeira Brito

INTRODUÇÃO	1171
DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO	1172
ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	1174
RESULTADOS E DISCUSSÃO	1177
CONCLUSÕES	1181
AGRADECIMENTOS	1181
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1181

**FERRAMENTA DE INFRAESTRUTURAS RESILIENTES:
PLANEJAMENTO E MONITORAMENTO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS 1182**

Rafael Grinberg Chasles, Matheus Amaral Prates, Gean Kenid Sifronio Franco, Vinicius do Prado Capanema,
José Luiz Fuzaro Rodrigues, Carolina Iris Brasil Mariano, Bruna Donegá Alves, Daniel Matos & Anderson Barbosa Esteves

INTRODUÇÃO	1183
INFRAESTRUTURAS RESILIENTES	1184
O SISTEMA	1184
MATERIAIS	1185
Dados Satelitais	1185
Dados Cadastrais	1186
Área de Análise	1186
MÉTODOS	1186
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	1186
Normalized Difference Water Index (NDWI)	1187
Fire Information for Resource Management System (FIRMS)	1187
Temperatura de Superfície (Land Surface Temperature – LST)	1187
Uso e Ocupação da Terra (Land Use Land Cover - LULC)	1188
Emissões Atmosféricas (Metano - CH ₄)	1188
RESULTADOS	1188
NDVI	1189
NDWI	1189
LST	1190
Emissões Atmosféricas (Metano - CH ₄)	1191
CONSIDERAÇÕES FINAIS	1191
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1192

**RESILIÊNCIA DA INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA:
ESTUDO DE CASO DA PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM TALUDES COM
AS METODOLOGIAS GUT E AHP FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS 1194**

Bianca Paola Gabardo, Celso Luiz dos Santos Romeiro Júnior, Luiz Gustavo Blisa de Paula Ferreira, Luiz Marcelo de Souza

INTRODUÇÃO	1195
METODOLOGIA	1196
GUT	1196
AHP	1196
RESULTADOS E DISCUSSÕES	1198
GUT	1198
AHP	1199
DISCUSSÕES	1202
CONCLUSÃO	1203
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1204

DOI: 10.29327/1430212.49-67

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS POSSÍVEIS IMPACTOS DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE CASO DA MALHA DA CCR VIASUL 1205

William Fedrigo, Rodrigo de Sousa Rabelo, Bárbara Ribeiro Costa, Jhonnathan Preisner de Souza & Luis Miguel Gutierrez Klinsky

INTRODUÇÃO	1206
EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS OCORRIDOS NO RS EM 2023	1206
IMPACTOS DOS EVENTOS CLIMÁTICOS DE 2023 NO PAVIMENTO	1210
EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS DE 2024	1213
CONSIDERAÇÕES FINAIS	1215
REFERÊNCIAS	1216

DOI: 10.29327/1430212.49-63

ANÁLISE DOS EFEITOS DO CLIMA, DO TRÁFEGO E DO TIPO DE MISTURA NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS..... 1217

Clara Rayssa Romero Rodrigues Souza, Bruno Cavalcante Mota, Marcos Lamha Rocha, Francisco Thiago Sacramento Aragão & Luis Alberto Herrmann do Nascimento

INTRODUÇÃO	1218
METODOLOGIA	1218
Produção das Misturas Asfálticas	1218
Stress Sweep Rutting (SSR)	1221
Simulações no FlexPave 1.1	1221
RESULTADOS E DISCUSSÕES	1222
CONCLUSÕES	1227
AGRADECIMENTOS	1228
REFERÊNCIAS	1228

AVANÇOS TECNOLÓGICOS E METODOLOGIAS NA PAVIMENTAÇÃO E GESTÃO RODOVIÁRIA

DOI: 10.29327/1430212.49-72

ADEQUAÇÃO DO PLANO DE IMPLANTAÇÃO BIM DO DER/PR EM DECORRÊNCIA DA NOVA LEI DE LICITAÇÕES E CONTRATOS ADMINISTRATIVOS 1232

Leonardo da Silva Azevedo, Larissa Vieira, Débora dos Santos Alves, Lucas Rattmann Vieira Theulen, Bruno Heimbecker Liberato, André Luis Rehbein Boza & Silvana Bastos Stumm

INTRODUÇÃO	1233
A LEI N.º 14.133/2021 E O REGIME DE CONTRATAÇÕES INTEGRADAS	1233
REGULAMENTAÇÃO DA LEI FEDERAL E A ADOÇÃO DO BIM NO ÂMBITO DO ESTADO DO PARANÁ	1234
ESTRATÉGIAS PARA DISSEMINAÇÃO DO BIM	1235
Estratégia BIM BR	1235
Estratégia BIM PR	1235
O PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO BIM NO DER/PR	1236
Três dimensões fundamentais da metodologia BIM.....	1237
ADEQUAÇÃO DO PLANO DE IMPLANTAÇÃO BIM NO DER/PR	1238
Etapa 1 – Adoção	1239
Etapa 2	1239
Etapa 3	1239
Adaptações nas atividades do Plano de Implantação BIM do DER/PR face à nova Lei de Licitações	1240
Tecnologias	1240
Políticas	1240
Processos	1240
CONSIDERAÇÕES FINAIS	1242
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1243

DOI: 10.29327/1430212.49-73

FLUXO DE TRABALHO PARA ORÇAMENTAÇÃO EM BIM DE OBRAS RODOVIÁRIAS 1244

Paulo Alberto Sampaio Santos, Matheus Lima de Barros, Melissa Midori Yamada & José Vinícius Silva Martins

INTRODUÇÃO	1245
BIM APLICADO A INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA	1245
ORÇAMENTAÇÃO DE OBRAS DE INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA	1246
ETAPAS METODOLÓGICAS	1246
i) Definição dos Requisitos para Orçamento	1246
ii) Modelagem BIM do Estudo de Caso	1246
iii) Processo de Extração de Quantidades	1247
iv) Elaboração do Orçamento em BIM	1248
RESULTADOS E DISCUSSÃO	1248
i) Requisitos dos Elementos do Modelo BIM	1248
ii) Extração de Serviços de Terraplenagem	1250
iii) Serviços de Desmatamento, Destocamento, Limpeza de Áreas e Estocagem	1251
iv) Serviços de Transportes de Carga	1252
v) Serviços de Camadas de Suporte do Pavimento e Revestimento Asfáltico.....	1252
vi) Processo de Orçamentação	1253
CONCLUSÃO	1254
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1255

DOI: 10.29327/1430212.49-75

INDICADORES DE DESEMPENHO COMO FERRAMENTA DE SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO PARA A GERÊNCIA DE ESTRUTURAS NO ÂMBITO DO DNIT 1256

Paulo Fernando Matos de Santana, Jorge Martins Sarkis, Sarah da Silva Brito, Rogério Calazans Verly, Wallas Borges Araújo, Cintia Adriana Azevedo de Liz Anhaia

INTRODUÇÃO	1257
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1258
METODOLOGIA	1260
Analytic Hierarchy Process (AHP)	1260
Metodologia GDE/UnB	1263
Redundância estrutural	1263
RESULTADOS E DISCUSSÕES	1265
CONCLUSÕES	1266
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1267

DOI: 10.29327/1430212.49-74

INSPEÇÕES EM OBRAS DE ARTE ESPECIAIS DA MALHA RODOVIÁRIA DO ESPÍRITO SANTO 1268

Mariana Maretto Motta, Isis Cler Depolli, Pedro Henrique Avancini Guimarães & Maria Juliana Anastácio Santana

INTRODUÇÃO	1269
METODOLOGIA DAS INSPEÇÕES	1269
MALHA RODOVIÁRIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO	1270
Análise Hidrográfica e Topográfica Do Espírito Santo	1270
Sistema Rodoviário Do Estado Do Espírito Santo	1271
ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DAS INSPEÇÕES DAS PONTES	1273
Pontes Nota Técnica Geral 1	1275
Pontes Nota Técnica Geral 2	1276
Pontes Nota Técnica Geral 3	1276
Pontes Nota Técnica Geral 4	1277
Pontes Nota Técnica Geral 5	1277
CONCLUSÃO	1278
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1279

DOI: 10.29327/1430212.49-2

CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DEFLECTOMÉTRICOS OBTIDOS COM VIGA BENKELMAN E DEFLECTÔMETRO DE PESO LEVE (LWD): ESTUDO DE CASO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PAVIMENTO 1280

Maurício Nunes Cabral, Martônio José Marques Francelino, Wanderson Freitas Lucio

INTRODUÇÃO	1281
REFERENCIAL TEÓRICO	1282
Análise de Correlação entre Dados Deflectométricos Obtidos por Diferentes Ensaios	1282
METODOLOGIA	1283
Caracterização da Área de Estudo.....	1283
Estudos de Campo: Ensaios de Viga Benkelman e LWD.....	1283
Análise Estatística	1285
RESULTADOS E DISCUSSÃO	1286
Dados dos Ensaios de Campo	1286
Dados das Análises Estatísticas	1288
CONCLUSÃO, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS	1289
REFERÊNCIAS	1290

DOI: 10.29327/1430212.49-5

UMA ANÁLISE DA MALHA RODOVIÁRIA FEDERAL BRASILEIRA USANDO PARÂMETROS OBTIDOS COM O ENSAIO FWD..... 1292

Bruno Marques de Castro, Emerson Aparecido de Anhaia, Victor Leandro Chaves Garcia, Giulia Araújo Carvalho, Victor Hugodalostro de Oliveira

1 - INTRODUÇÃO	1293
2 - METODOLOGIA	1293
2.1 – Parâmetros analisados.....	1294
2.1.1 – Índice da Curvatura da Superfície (SCI)	1294
2.1.2 – Índice de Danos à Base (BDI).....	1294
2.1.3 – Índice da Curvatura da Base (BCI)	1294
2.1.3 – Raio de Curvatura (R_c).....	1295
2.2 – Critérios de classificação	1295
3 - RESULTADOS	1296
4 - CONCLUSÃO	1300
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1302

**AVANÇOS TECNOLÓGICOS E CONTROLE DE QUALIDADE
NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA..... 1303**

Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli, Flaviane Beltrão Silva, Anna Luiza Bragaamaral

INTRODUÇÃO	1304
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1304
Avanços Tecnológicos no Controle de Qualidade e Eficiência na Pavimentação	1305
Importância e Procedimentos do Controle Tecnológico em Obras de Pavimentação.....	1306
MÉTODOS	1307
Identificação e contextualização de trecho através de ferramentas <i>GIS</i>	1307
Coleta da amostra de Asfalto	1308
Medidas de Diâmetro e Espessura.....	1309
Teor de Betume.....	1310
Granulometria.....	1311
DISCUSSÕES	1312
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1313

**CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DA COMPACTAÇÃO
IN SITU DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS..... 1315**

Jorge Luis Santos Ferreira, Euller Loiolasena, Eliardo Soares Coelho, Juceline Batista Dos Santos Bastos, Jorge Barbosa Soares

INTRODUÇÃO	1316
MATERIAIS E MÉTODOS.....	1317
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	1319
Análise Descritiva das Medições.....	1319
Avaliação da Uniformidade Executiva	1320
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	1322
REFERÊNCIAS	1323

UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO E DA CLASSIFICAÇÃO MCT PARA CARACTERIZAR AS LATERITAS UTILIZADAS EM BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE 1326

Felicio Geraldo de Oliveira, Eleonardo Lucas Pereira, Geraldo Luciano de Oliveira Marques, Tayane Aparecida Fernandes, Gabriela Júvia de Oliveira, Altamir Augustocosta, Whilson Marques Mendonça

INTRODUÇÃO	1327
REFERENCIAL TEÓRICO	1328
Adsorção de Azul de Metileno.....	1328
Classificação MCT.....	1329
MATERIAIS E MÉTODOS.....	1329
RESULTADOS E ANÁLISES	1330
Análise Granulométrica.....	1330
LL, LP e Equivalente de Areia.....	1331
Compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão	1332
Adsorção de Azul de Metileno	1332
Relação Sílica Sesquióxidos e Classificação MCT	1333
Discussão a Respeito dos Resultados da Adsorção de Azul de Metileno e do Equivalente de Areia	1334
Discussão a Respeito dos Resultados da Classificação MCT e dos Resultados Obtidos Através do Critério de Determinação do Caráter Laterítico Adotado pela Norma DNIT 098/2007.....	1335
CONCLUSÕES	1335
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1336

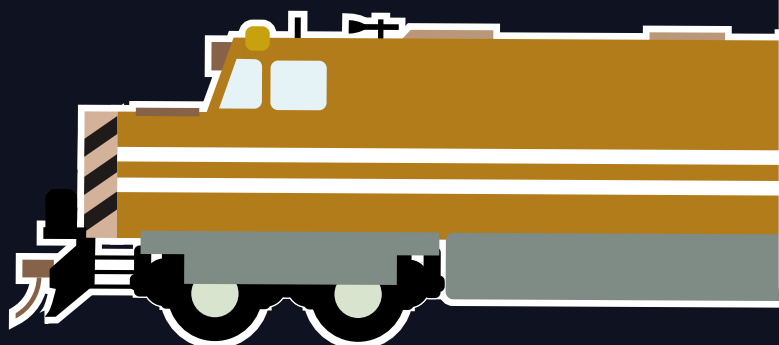


26° Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br



ABDER



**DESEMPENHO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS**

PROGRAMAÇÃO
TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS E ESTUDOS DE CASOS DE OBRAS
Terça-feira, 20 de agosto

SALA ABAIS		
DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS (ST01)		
⌚ 09:00	TT155	ANÁLISE DA DENSIFICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS NO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE EM FUNÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA E DA ESPESSURA DA CAMADA
⌚ 09:20	TT187	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE GOLPES NA COMPACTAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CPA
⌚ 09:40	EC525	ASFALTO REJUVENESCIDO BENEFICIADO A FRIO PARA USO EM OPERAÇÃO TAPA BURACOS
⌚ 10:20	TT435	ANÁLISE DE CONCRETO ASFÁLTICO ESTOCÁVEL PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS
⌚ 10:40	EC154	ADEQUAÇÕES REALIZADAS NO DAER-RS NAS COMPOSIÇÕES DE CONCRETO ASFÁLTICO, CONSIDERANDO A METODOLOGIA SICRO
⌚ 11:00	TT927	ANÁLISE DE DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURA ASFÁLTICA MORNIA COM LIGANTE DE ALTO MÓDULO MODIFICADO COM POLÍMERO À BASE DE POLIETILENO
⌚ 11:20	TT546	ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM MISTURA ASFÁLTICA COM ALTA RESISTÊNCIA A FADIGA
⌚ 11:40	TT117	APLICAÇÃO DO ENSAIO IDEAL-CT PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS
⌚ 12:00	TT548	COMPARAÇÃO DO PARÂMETRO FATOR DE FADIGA DA MISTURA (FFM) OBTIDO POR DIFERENTES ENSAIOS
⌚ 12:20	TT854	EXPLORANDO O DESEMPENHO DE FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM BASE NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO LINEAR



ANÁLISE DA DENSIFICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS NO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE EM FUNÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA E DA ESPESSURA DA CAMADA

Douglas Antônio Thiel¹; Allan Monteiro Silva¹; Ana Carolina Ostrovski¹ e Andreia Raffler¹

RESUMO

As misturas de concreto asfáltico usinado a quente são amplamente utilizadas no Brasil para a construção de pavimentos. Para a execução destes revestimentos, normas consagradas limitam a espessura das camadas em função do tamanho nominal máximo (TNM) das curvas granulométricas das misturas. O principal objetivo destas restrições é evitar problemas de compactação em campo. Os baixos níveis de compactação das misturas em função do elevado volume de vazios pode gerar defeitos precoces nos pavimentos, como fadiga e deformação permanente. Para efeitos de análise do comportamento de densificação das misturas, o Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes (DNIT) publicou a norma 426/2020, na qual se utiliza o compactador giratório Superpave para monitorar o ganho de densidade de misturas asfálticas. Muito embora estudos já tenham sido conduzidos na busca de correlacionar parâmetros de densificação com o surgimento de defeitos precoces nos pavimentos, carecem investigações acerca do comportamento de densificação das misturas asfálticas em função da granulometria e do TNM. Assim, o objetivo desta pesquisa é avaliar como as misturas asfálticas se densificam em função da curva granulométrica, do TNM e da espessura da camada. Para isso, amostras foram submetidas à compactação no compactador giratório Superpave até o número de giros de 250. Avaliou-se a densificação por meio do percentual da densidade máxima medida atingida em cada giro. Observou-se que o tanto o TNM quanto a granulometria da mistura exercem influência no comportamento de densificação. Notou-se também que as especificações de espessura analisadas se mostraram insuficientes para garantir os parâmetros volumétricos esperados para a mistura.

PALAVRAS-CHAVE: misturas asfálticas; granulometria; densificação.

ABSTRACT

Hot asphalt concrete mixtures are widely used in Brazil for of asphalt pavements construction. To build pavements, important standards limit the thickness of the layers depending of nominal maximum aggregate size (NMAS), and mixtures' size distribuiton. The main objective of these restrictions is to avoid site compaction problems. The low compaction levels of mixtures due to high void volumes can generate early defects in the pavements, such as fatigue cracking and rutting. For the purposes of analyzing the densification behavior of mixtures, the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) published standard 426/2020, in which the Superpave giratory compactor is used to predict the density gain of asphalt mixtures. Although studies have already been conducted aiming to correlate densification parameters with the appearance of early defects in pavements, there is a lack of investigation into the densification behavior of asphalt mixtures as a function of granulometry and NMAS. Therefore, the objective of this research is to evaluate asphalt mixtures densify depending on the particle size distribution, NMAS and layer thickness. For that, samples were subjected to compaction in the Superpave giratory compactor until the number of 250 gyrations. Densification was evaluated using the percentage of the maximum measured density reached in each gyration. It was observed that NMAS and the particle size distribution of the mixture influence the densification behavior. It was also noted that the thickness specifications analyzed proved to be insufficient to guarantee the volumetric parameters expected for mixtures.

KEY WORDS: asphalt mixture; size distribution; densification.

¹ E-Vias Tecnologia em Infraestrutura Viária Ltda., e-mail: douglas.thiel@e-vias.com.br; allan@e-vias.com.br; ana.ostrovski@e-vias.com.br; andrea.raffler@gmail.com.



DOI: [10.29327/1430212.49-28](https://doi.org/10.29327/1430212.49-28)

ANÁLISE DA DENSIFICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS NO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE
EM FUNÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA E DA ESPESSURA DA CAMADA

INTRODUÇÃO

As rodovias brasileiras são predominantemente pavimentadas com revestimento de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ). O CAUQ é um composto de ligante e agregados pétreos, este último respondendo por mais de 90% do volume total da mistura. Neste composto, podem ser adicionados materiais de *filler*, como cal, e melhoradores de adesividade, *e.g.* Na mistura asfáltica, o ligante é responsável pelo envolvimento das partículas de agregados, ao passo que o agregado é responsável por conferir a resistência às tensões de compressão pelos veículos, provendo o esqueleto mineral da mistura (BERNUCCI *et al.*, 2022; GOUVEIA; FERNANDES JR.; SOARES, 2007).

A conformação da estrutura interna da mistura se dá por meio do processo de compactação. Ao longo da compactação, reduzem-se os vazios a fim de constituir uma adequada interação entre as partículas de agregado. A formação deste esqueleto depende de fatores como energia de compactação aplicada, temperatura, proporção de materiais e de propriedades do agregado, como forma, angularidade e textura, além da granulometria (GOUVEIA; FERNANDES JR.; SOARES, 2007).

Em termos de compactação em campo, algumas especificações técnicas consagradas no país têm se preocupado com a capacidade de se atingir os parâmetros volumétricos de projeto em função do tamanho máximo do agregado. Para tanto, toma-se a definição da norma DNIT 412/2019-ME (DNIT, 2019), na qual o tamanho nominal máximo (TNM) é o tamanho da abertura da peneira imediatamente acima daquela que retém mais que 10% acumulado da distribuição granulométrica.

Com base no TNM, as especificações de execução da mistura asfáltica em campo estipulam a espessura mínima que determinada camada deve ter em função deste parâmetro. As especificações DNIT 031/2006-ES (DNIT, 2006) e DER/PR ES-PA 21/23 (DER-PR, 2023) limitam o TNM a 2/3 da espessura da camada. Já especificações de concessionárias, como Arteris ES 027 (ARTERIS, 2022) define que a espessura da camada compactada deve ser maior que 2,5 vezes o TNM.

Ao se analisar a especificação MS-2 do Asphalt Institute (2014), registra-se uma restrição ainda maior em relação à espessura das camadas de revestimento asfáltico, recomendando espessura mínima da camada de misturas asfálticas densas igual a quatro vezes o TNM. Ainda, o mesmo manual indica que espessuras de até duas vezes o TNM podem apresentar performance diminuída. De comum acordo, pode-se verificar que as especificações nacionais e estrangeiras buscam garantir que a compactação do CAUQ seja satisfatória.

Para verificação do comportamento de densificação de misturas asfálticas pode-se utilizar o compactador giratório Superpave (CGS), considerando-se variáveis como a granulometria da mistura e diferentes espessuras da amostra. Além disso, o CGS é um bom indicativo do comportamento de densificação da mistura em campo uma vez que o processo de compactação se dá por amassamento, simulando o rolo compactador no processo de execução do revestimento (RIBAS; THIVES, 2019).

No Brasil há a norma DNIT 426/2020-IE (DNIT, 2020), que prevê a obtenção de dois parâmetros de densificação por meio do CGS, denominados de índice de densificação por compactação (CDI) e índice de densificação pelo tráfego (TDI). O CDI está relacionado a energia necessária para compactar a mistura asfáltica em campo durante o processo de execução, tendo vinculação com a obtenção de 92% da densidade máxima medida da mistura (*Gmm*). Já o TDI é correspondente ao processo de tráfego dos veículos após a entrega da obra, correlato aos 98% da *Gmm* (DNIT, 2020). A avaliação dos parâmetros de compactação da mistura asfáltica foi investigada por Nascimento



(2008), Guimarães *et al.* (2022), Onofre *et al.* (2011) e Soares (2014), no objetivo de estipular correlação entre a compactação da mistura e a deformação permanente. Todavia, carecem estudos que visem analisar a influência da granulometria e da espessura das camadas de CAUQ no comportamento de densificação da mistura. A adoção dos parâmetros de 92 e 98% da *Gmm* podem servir de indicativo para a análise do comportamento de densificação da mistura em função do número de ciclos.

Ainda, as restrições de espessura em função do TNM necessitam ser avaliadas quanto à suscetibilidade à densificação de misturas asfálticas compostas de diferentes faixas granulométricas e da espessura da camada. Esta análise visa identificar a influência da espessura e da energia de compactação aplicada na densificação de misturas asfálticas tanto a nível de laboratório quanto de campo.

Outrossim, o objetivo do presente trabalho é verificar o comportamento de densificação de misturas asfálticas com diferentes granulometrias, avaliando-se a influência da restrição de altura de camada de revestimento imposta pelas especificações de serviço do DNIT (2006) e DER-PR (2023).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação dos parâmetros de compactação, foram selecionadas misturas asfálticas produzidas com ligante CAP 50-70, oriundo da refinaria REPAR, localizada no município de Araucária, PR. Os agregados utilizados para a produção das misturas têm origem basáltica, provenientes de Coronel Vivida, PR, e Siqueira Campos, PR. As misturas asfálticas foram dosadas segundo a metodologia de volumetria Marshall (DNER, 1995). A escolha da metodologia de dosagem Marshall se deu pelo fato de que a maioria dos projetos brasileiros são realizados por meio deste procedimento. Fatores como facilidade de verificação dos parâmetros volumétricos em campo e dispensa de equipamentos sofisticados para elaboração de corpos de prova de checagem subsidiam esta predileção pela metodologia Marshall na elaboração dos projetos. Os resultados da dosagem, bem como as faixas granulométricas adotadas nas misturas estão apresentados na Tabela 1. A Figura 1 traz a demonstração gráfica das curvas granulométricas.

Tabela 1. Resultados volumétricos de dosagem das misturas asfálticas produzidas para o ensaio de parâmetros de compactação

Faixa granulométrica	B (DER-PR, 2023)	C (DER-PR, 2023)	C adapt. (DNIT, 2006)	C (DNIT, 2006)
TNM (mm)	19,1	19,1	12,7	19,1
Teor de ligante (%)	4,3	4,5	5,1	4,7
Vv (%)	5,0	4,2	4,7	3,9
RBV (%)	68,9	73,3	73,8	75,5
VAM (%)	16,2	15,9	18	15,9
<i>Gmb</i>	2,521	2,537	2,500	2,581
<i>Gmm</i>	2,655	2,650	2,624	2,686
MF	4,95	4,75	4,63	4,84

TNM: tamanho nominal máximo | Vv: volume de vazios | RBV: relação betume-vazios | VAM: vazios no agregado mineral | *Gmb*: massa específica aparente | *Gmm*: massa específica máxima medida | MF: módulo de finura

É possível extrair da Tabela 1 que as misturas asfálticas produzidas com faixa B DER-PR, C DER-PR e C DNIT apresentam o mesmo TNM, sendo que a faixa C DNIT adaptada à reperfilagem



DOI: 10.29327/1430212.49-28

ANÁLISE DA DENSIFICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS NO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE
EM FUNÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA E DA ESPESSURA DA CAMADA

possui TNM menor, de 12,7 mm. Todavia, ao se observar o módulo de finura (MF) das misturas, nota-se que a faixa B DER-PR apresenta o maior valor, sendo a faixa que contém maior percentual de agregados graúdos, seguido das faixas C DNIT e C DER-PR. A faixa C DNIT adaptada à reperfilagem, além de apresentar o menor TNM, também possui maior quantidade de partículas finas de todas as faixas comparadas, comprovado pelo menor valor de MF.

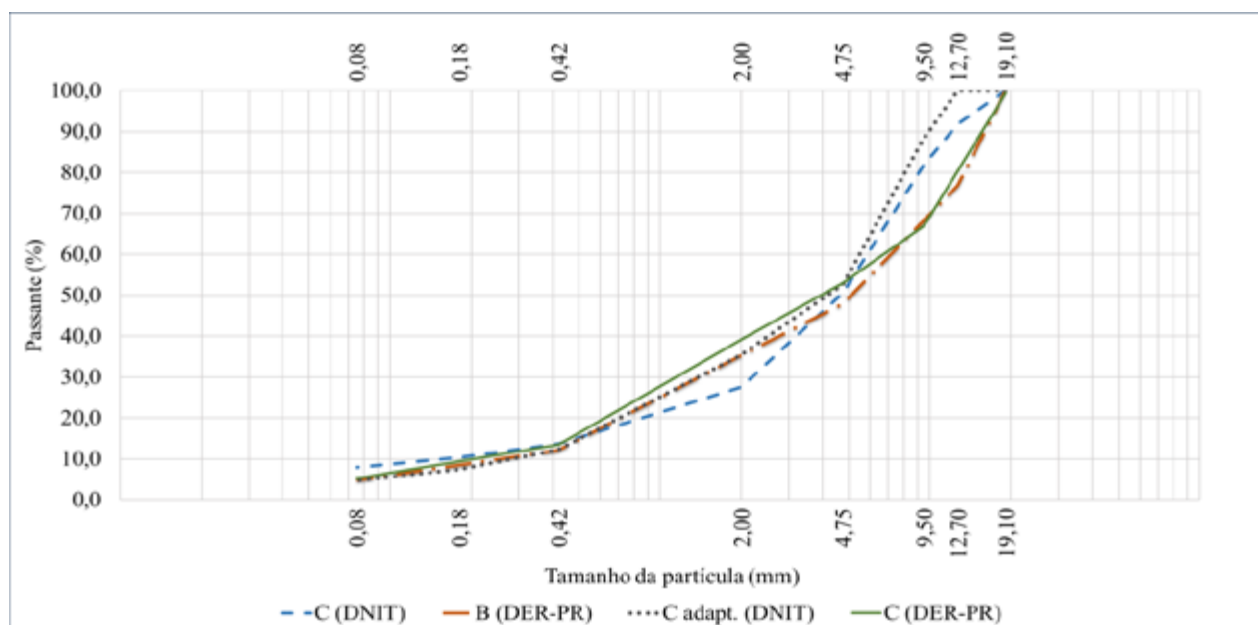


Figura 1. Curvas granulométricas do projeto de dosagem das misturas asfálticas compactadas no CGS

Para a avaliação do comportamento de densificação das misturas apresentadas na Tabela 1, foram preparadas 02 amostras por espessura para cada uma das faixas granulométricas, sendo utilizadas espessuras de 30, 50 e 70 mm (Figura 2). A massa das amostras foi determinada em função da G_{mb} oriunda do projeto de dosagem. Após o período de condicionamento em estufa em temperatura de 144°C, a mistura foi colocada no molde do CGS de diâmetro de 150 mm. Na sequência, as amostras foram inseridas no CGS para aplicação dos ciclos, com pressão de 605 kPa e ângulo de giro de 1,25°. Todas as amostras foram submetidas ao número máximo de 250 giros. A escolha de 250 como o número máximo de giros (N_{max}) se deu para promover a análise do comportamento de densificação mesmo após a ação de tráfego extremo. A condição de alto volume de tráfego é equivalente ao $N_{max} = 205$, conforme a norma R 35-17 (AASHTO, 2020). Por fim, obteve-se, do CGS, a altura em cada um dos giros, dos quais foi calculada a G_{mb} da amostra por giro, conforme método disposto na norma DNIT 426/2020-IE (DNIT, 2020).

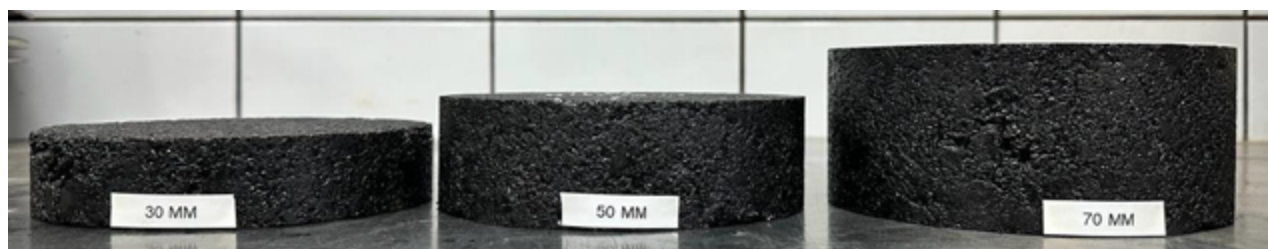


Figura 2. Exemplo de mistura asfáltica compactada no CGS com diferentes espessuras



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 estão apresentadas as curvas de densificação obtidas do CGS para as misturas produzidas com agregados enquadrados na Faixa B da especificação do DER-PR. É possível observar que aos 100 giros as amostras com espessura de 50 e 70 mm atingiram ao menos 92% da Gmm . A análise do parâmetro de Gmm aos 100 giros se justifica pela equivalência deste parâmetro com o número de giros de projeto para rodovias de médio a alto tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2022). Este valor tem sido adotado em trabalhos como o de Thiel (2023). Esta expectativa é corroborada pela especificação ET-DE-P00/027 (DER-SP, 2007), ao determinar grau de compactação de pista admissível em valores acima de 92% da Gmm .

Em sequência, ao se analisar a mesma mistura com 30 mm de espessura, verificou-se que o valor de 92% da Gmm não foi atingido nem aos 250 giros. Na prática, pode-se notar que a baixa espessura da amostra comprometeu a compactação da mistura a níveis exigidos de projeto. É possível que a faixa granulométrica com maior presença de agregados graúdos, comprovado pelo maior valor de MF de todas as misturas, tenha contribuído para a baixa densificação. Ainda, verifica-se que a taxa de densificação aproximou-se de nula a partir dos 175 ciclos. O esqueleto mineral formado por agregados maiores e baixo percentual de finos pode ter contribuído para os resultados colhidos, conforme sugere Hassan *et al.* (2021).

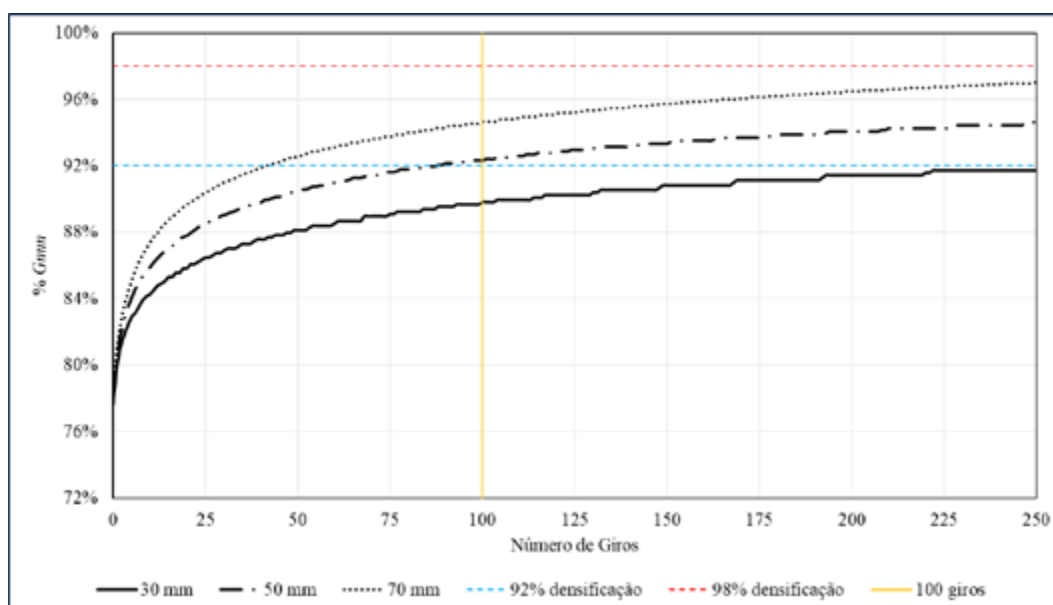


Figura 3. Curvas de densificação das amostras produzidas com agregados enquadrados na “Faixa B” DER-PR

Em análise das curvas de compactação da mistura produzida com agregados enquadrados na Faixa C da especificação DER-PR (Figura 4), é possível notar que as misturas com 50 e 70 mm de espessura atingiram 92% da Gmm mesmo antes de se completarem os 100 giros. A mistura com 30 mm atingiu 92% da Gmm próximo do fim do processo de compactação (245 giros). Em comparação à mistura da Faixa B DER-PR (Figura 3), é possível verificar que a granulometria mais fina da mistura da Faixa C DER-PR colaborou para melhor densificação das amostras com 50 e 70 mm. Entretanto, observa-se que o TNM idêntico das duas faixas pode ter contribuído para a mistura moldada com 30 mm de espessura alcançasse o volume de vazios somente com grandes esforços de



DOI: 10.29327/1430212.49-28

ANÁLISE DA DENSIFICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS NO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE
EM FUNÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA E DA ESPESSURA DA CAMADA

compactação, o que de modo análogo em campo seria muito difícil de se atingir, uma vez que a mistura asfáltica já teria perdido temperatura, tornando o ligante mais viscoso e menos suscetível a conformação.

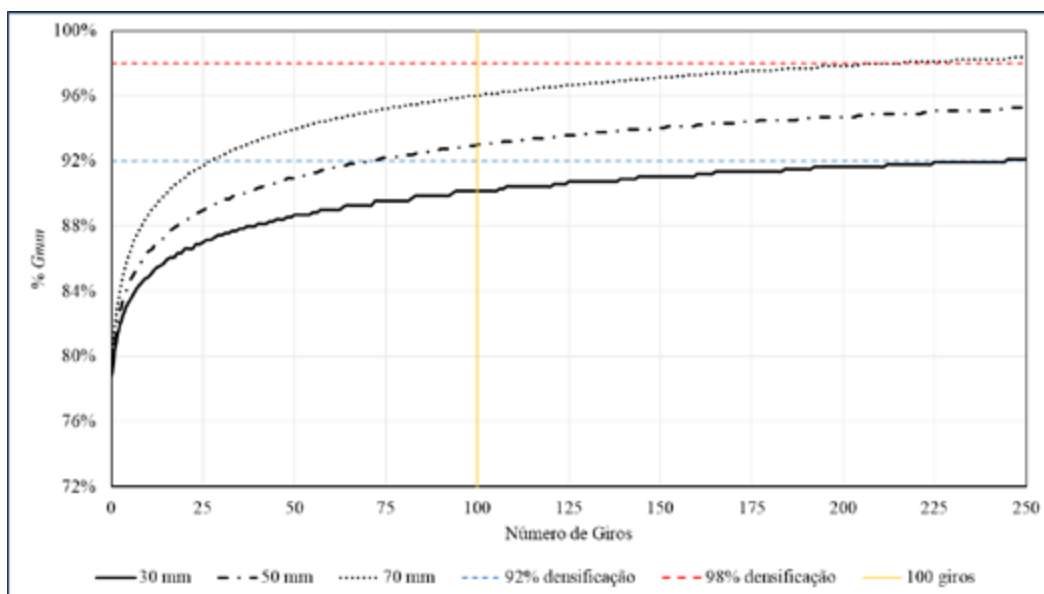


Figura 4. Curvas de densificação das amostras produzidas com agregados enquadrados na “Faixa C” DER-PR

Em última análise da Figura 4, verifica-se que somente as amostras com espessura de 70 mm atingiram 98 % da *Gmm*. Ao mesmo tempo, analisando os corpos de prova com espessura de 30 mm, verifica-se dificuldade de compactação. Em campo, esta dificuldade pode ser traduzida em baixos graus de compactação ($Gmb < 97\%$), segundo os critérios da norma DNIT 031/2006-ES (DNIT, 2006).

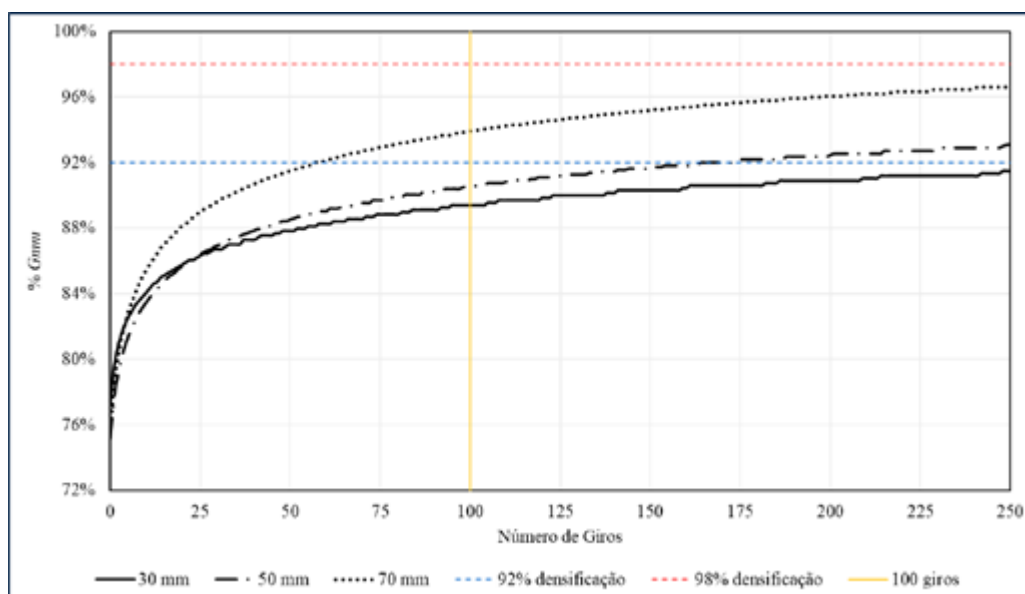


Figura 5. Curvas de densificação das amostras produzidas com agregados enquadrados na “Faixa C” DNIT



Douglas Antônio Thiel,
Allan Monteiro Silva,
Ana Carolina Ostrovski,
Andreia Raffler

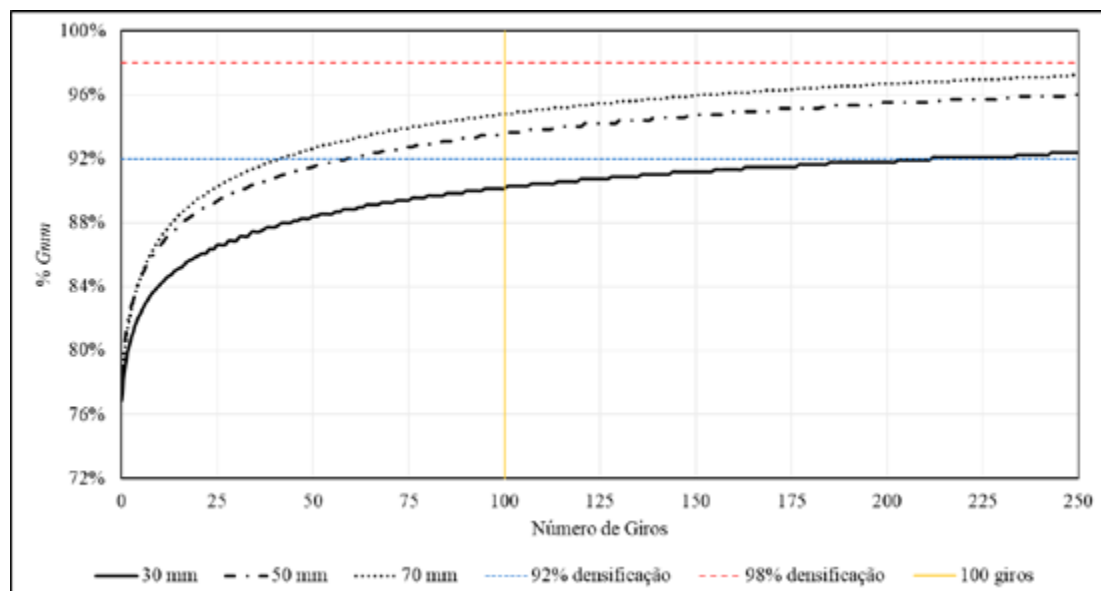


Figura 6. Curvas de densificação das amostras produzidas com agregados enquadrados na “Faixa C” DNIT, adaptada à reperfilagem

Na sequência, analisa-se conjuntamente as curvas de densificação das misturas produzidas com a faixa C do DNIT (Figura 5) e a faixa C DNIT adaptada à reperfilagem (Figura 6). Extrai-se dos resultados que a mistura produzida com agregados enquadrados na faixa C DNIT atingiu 92% da *Gmm* nas espessuras de 70 e 50 mm, sendo a primeira alcançada antes dos 100 giros no CGS. Já em análise da faixa C adaptada, independente da espessura atingiu-se 92% da *Gmm*. Aponta-se que o menor valor de TNM da faixa C adaptada à reperfilagem pode ter exercido influência na melhor densificação da mistura. Ainda, o menor valor de MF também pode ter participado na maior densificação notado nas misturas da faixa C adaptada.

A Tabela 2 contém um resumo dos resultados de número de giros necessários para que se atingisse 92% da *Gmm* para cada uma das curvas granulométricas das misturas em cada uma das três espessuras analisadas. É possível notar que as amostras com espessura mais delgada (30 mm) tiveram dificuldade de atingir 92% da *Gmm*, mesmo em grandes esforços de compactação. Ainda, misturas com TNM de 19,1 mm e granulometrias com maior percentual de agregados graúdos não atingiram 92% de *Gmm* nem ao final dos 250 ciclos. Já no que tange a espessura de 50 mm, somente a faixa C DNIT não atingiu 92% da *Gmm* aos 100 ciclos, o que pode significar dificuldade de compactação em campo para esta espessura. Em análise das especificações do DER-PR (2023) e do DNIT (2006), nota-se que o TNM de 19,1 mm exigiria espessura da camada mínima de 28,7 mm. Já para o TNM de 12,7 mm, se exigiria camada de espessura mínima de 19,1 mm. Os resultados da Tabela 2, todavia, comprovam incapacidade de densificação para as espessuras mínimas de 30 mm em qualquer uma das faixas granulométricas, considerando-se $N = 100$ giros. Por sua vez, a espessura de 50 mm tem demonstrado bom comportamento de compactação, atingindo-se o parâmetro de 92% da *Gmm* antes dos 100 giros em todas as curvas granulométricas, à exceção da faixa C DNIT (2006). Por fim, registra-se que o parâmetro de 98% da *Gmm* só foi atingido na Faixa C DER-PR (2023) na espessura de 70 mm, aos 217 giros.



DOI: 10.29327/1430212.49-28

ANÁLISE DA DENSIFICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS NO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE
EM FUNÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA E DA ESPESSURA DA CAMADA**Tabela 2. Resumo do número de giros no CGS necessários para se atingir 92% da *Gmm***

Faixa Granulométrica	Espessura da amostra		
	30 mm	50 mm	70 mm
B (DER-PR, 2023)	-	88	42
C (DER-PR, 2023)	245	70	27
C (DNIT, 2006)	-	174	57
C adapt. (DNIT, 2006)	212	59	41

Em linhas gerais, com os resultados colhidos se verificou que especialmente nas amostras com 30 mm de espessura, há uma tendência de estabilidade da taxa de densificação ao se atingir número giros mais elevados no CGS. Na prática, isso significa que mesmo se utilizando de grandes energias de compactação em campo, a densificação almejada não será atingida. Condição análoga foi observada por Gouveia, Fernandes Jr. e Soares (2007), ao evidenciar que misturas asfálticas não sofreram maior densificação em função do aumento da energia de compactação, comprovando-se pela estabilidade no valor de volume de vazios mesmo aplicando-se 75, 110 e 155 golpes por face no soquete Marshall.

Ainda, Onofre *et al.* (2011) apontam que alto percentual de agregados graúdos pode levar a impossibilidade de se atingir valores de densificação desejados. Em análise dos resultados apresentados, nota-se que as misturas produzidas com a faixa B DER-PR e C DNIT podem corroborar esta tese, uma vez que além do TNM de 19,1 mm possuem também os maiores valores de MF.

CONCLUSÃO

Considerando os resultados dos ensaios laboratoriais encontrados na pesquisa de densificação de misturas asfálticas com diferentes curvas granulométricas, pode-se concluir que:

- Um eventual revestimento asfáltico de espessura igual a 2/3 do TNM das amostras desta pesquisa não atingiram 92% da *Gmm* após o processo de compactação;
- Exigências de espessuras de revestimento maiores, como a da especificação MS-2 (ASPHALT INSTITUTE, 2014) se mostram mais adequadas a garantia da densificação adequada das misturas asfálticas;
- Na análise realizada, o TNM é preponderante na influência do ganho de densificação de misturas asfálticas. Todavia, registra-se que o percentual de partículas graúdas (comprovado pelo MF) também influencia na densificação da mistura.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **R 35-17**: Superpave volumetric design for asphalt mixtures. Washington, 2020.

ASPHALT INSTITUTE. **MS-2 Asphalt mix design methods**. 7. ed. Washington: Asphalt Institute, 2014.

ALMEIDA JUNIOR, Pedro Orlando; BOEIRA, Fernando Dekeper; SPECHT, Luciano Pivoto; CERVO, Tatiana Cureau; PEREIRA, Deividi da Silva; CENTOFANTE, Roberta; BARBOZA JUNIOR, Valdir dos Santos; SILVA, Carlos Filipe Correia e. Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente



de misturas asfálticas. **Transportes**, v. 26, n. 2, p. 1-15, 2018.

ARTERIS. **Especificações técnicas para materiais e execução de serviços**: pavimentação. São Paulo, 2022, 479 p.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 2ª ed. Rio de Janeiro: Petrobras/ABEDA, 2022.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ (DER-PR). **ES-PA 21/23**: Pavimentação: concreto asfáltico, usinado à quente. Curitiba, 2023, 31p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (DER-SP). **ET-DE-P00/027**: concreto asfáltico. São Paulo, 2007, 45p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **043**: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995, 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **031**: Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação de serviço. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006, 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **412**: Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2019. 12 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **426**: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação dos parâmetros CDI e TDI – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2020. 9 p.

GOUVEIA, Lilian Tais de; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar; SOARES, Jorge Barbosa. Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 15, p. 34-41, 2007.

GUIMARÃES, Daniela Muniz D'antona; MOTTA, Laura Maria Goretti da; SILVA, Ben-Hur Albuquerque; FRITZEN, Marco Antônio; CASTRO, Carlos Eduardo Neves de. A influência da composição granulométrica segundo as metodologias Bailey, FAD e Marshall no desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 3, 18 p., 2022.

HASSAN, Hafiz Muhammad Zahid; WU, Kuanghuai; HUANG, Wenke; CHEN, Sihang; ZHANG, Qiran; XIE, Jiawen; CAI, Xu. Study on the influence of aggregate strength and shape on the performance of asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, v. 294, 123599, 2021. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123599.

NASCIMENTO, Luis Alberto Hermann. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008, 227p.

ONOFRE, Felipe Coutinho; BESSA, Iuri Sidney; BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo; SOARES, Jorge Barbosa. Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resistência à deformação permanente de misturas asfálticas convencionais e com resíduos. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 19, p. 13-22, 2011.

RIBAS, Cristine Yohana; THIVES, Liseane Padilha. Evaluation of effect of compaction method on the macrostructure of asphalt mixtures through digital image processing under Brazilian conditions. **Construction and Building Materials**, v. 228, 116821, 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116821.

SOARES, Jéssica Santiago. **Investigação da relação entre parâmetros da compactação giratória e de deformação permanente em misturas asfálticas densas**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

THIEL, Douglas Antônio. **Desempenhos de misturas e ligantes asfálticos modificados com borracha moída de pneus e copolímero SBS quanto à fadiga e à deformação permanente**: estudo de caso na rodovia SC-163. Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2023, 143p.



ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE GOLPES NA COMPACTAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CPA

Victor Manuel de Queiroz Lourenço²; Aline Cristina de Andrade Lima¹; Caroline Cristina Pereira dos Santos¹ & Joelson Hora Costa²

RESUMO

O objetivo do trabalho é analisar a influência do número de golpes na confecção de corpos de prova de misturas do tipo CPA, afim de se conhecer o real motivo de não se moldar com 75 golpes, valor de referência da metodologia Marshall, e sim com 50 de acordo com informações encontradas na literatura. Foram moldados 18 corpos de prova, com ligante do tipo CAP 50/70 no teor de 4,5%. Desse total, metade sofreu 75 golpes e a outra metade 50 golpes com o intuito de realizar alguns ensaios que sofressem interferência na compactação para que pudesse ser feita uma comparação entre elas a fim de se obter a quantidade de golpes ideal. Os ensaios realizados foram densidade aparente, determinação do volume de vazios, resistência à tração por compressão diametral e desgaste por abrasão – Ensaio Cântabro, além de extração de betume e granulometria. A partir dos resultados desses ensaios, observa-se que ambas as energias são passivas de uso, e desse modo para o material utilizado e a faixa granulométrica adotada, concluiu-se que não é possível preestabelecer o número de golpes a ser utilizado, contrapondo o que vem sendo dito na literatura, pois precisa-se identificar a energia de campo a ser utilizada, para então, definir o número de golpes em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE: Camada Porosa de Atrito; moldagem; quantidade de golpes; compactação.

ABSTRACT

The aim of this work is to analyze the influence of the number of blows on the preparation of test samples of PFL mixtures, in order to know the real reason behind not molding it with 75 strokes, the reference value of the Marshall methodology, but with 50, according to information found in the literature. Along these lines, we molded 18 samples with Asphalt Oil Cement (AOC) 50/70 binder featuring 4.5% content. Out of that, each half suffered 75 and 50 blows, respectively, in order to perform tests that could suffer compression excess interference so as to find out the ideal type of mix after comparing between them. We evaluated the apparent density, the determination of void volume, the tensile strength via diametrical compression, and the waste by the abrasion - Cantabrian Test, alongside the extraction of bitumen and granulometry. From these results, it is observed that both energies are passive in use, and therefore for the material used and the granulometry range adopted, it was concluded that it is not possible to preset the number of blows to be used, countering what has been said in the literature, since it is necessary to know the energy of field to be used, to then define the number of blows in the laboratory.

KEY WORDS: Porous friction layer; molding; compaction; blows number.

¹ Universidade Tira Dentes, aline_calima@hotmail.com; carolline_santos12@hotmail.com;

² Faculdade Pio Décimo, joelsonhcosta@gmail.com; victorqlourenco@gmail.com.

INTRODUÇÃO

A pavimentação de estradas surgiu com o desejo de criar uma superfície mais regular, mais aderente e de menos ruído, gerando assim melhores condições de rolamento, conforto e segurança para todos que nela trafegam. Com o passar do tempo novas técnicas foram surgindo, e novos tipos de revestimento apareceram, como a camada porosa de atrito (CPA) que possui função drenante, por conta da quantidade de vazios que possui entre agregados e ligante (BALBO, 2011).



Como a CPA funciona como um dreno, em tempos chuvosos, esse tipo de revestimento se torna bastante importante, pois a lâmina d'água não permanece na mistura por muito tempo gerando uma maior segurança aos cidadãos que trafegam pela via. Essa segurança ocorre por conta da redução do fenômeno da aquaplanagem e do spray que atinge os carros.

Para adequada confecção da mistura em campo, faz-se necessário uma análise prévia realizada em laboratório, por meio de corpos de prova, onde tenta-se obter a melhor relação entre os componentes do revestimento, além de se estimar alguns parâmetros de qualidade, por meio principalmente de ensaios mecânicos. No entanto, para esse tipo de mistura, não há no Brasil, normas regulamentadoras que norteiem acerca da moldagem desses corpos de prova.

Em obras rodoviárias é imprescindível a análise prévia dos materiais a serem utilizados, bem como da análise dessas camadas do pavimento após sua confecção. Isso é possível a partir da simulação dessas camadas em laboratório, por meio de corpos de prova. No entanto, ao se pesquisar sobre a moldagem de corpos de prova para camada porosa de atrito, há uma carência de informações sobre a quantidade de golpes que o corpo de prova deve sofrer de cada lado pela metodologia Marshall.

Na literatura, observa-se que a única norma existente para confecção de misturas asfálticas, é referente a metodologia de dosagem Marshall para concretos asfálticos usinados a quente (CAUQ). Nela, fica definido a quantidade de 75 golpes por face para moldagem dos corpos de prova. No entanto, Senço (2007), menciona que para misturas do tipo CPA, a quantidade de golpes deve ser 50 por face.

No Brasil, a única norma existente que aborda essa temática é a DNER-ES 386/99 “Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito”, onde é constatado que não há referência à quantidade necessária de golpes.

REFERENCIAL TEÓRICO

CPA é um tipo de mistura asfáltica drenante e é utilizada como camada de rolamento com o intuito de aumentar a aderência pneu-pavimento em dias de chuva. Isso ocorre porque ela é caracterizada por possuir, em sua maioria, agregados de mesmo tamanho gerando um esqueleto mineral cheio de vazios (BERNUCCI *et al.*, 2010). A norma DNER-ES 386/99 define a CPA como mistura asfáltica porosa (entre 18 e 25% vazios) preparada em usina a quente, composta de agregados, material de enchimento (fíler) e cimento asfálticos modificado ou não por polímero SBS (estireno-butadieno-estireno), espalhado e comprimido a quente.

Esse revestimento drenante reduz também o ruído provocado pela circulação do tráfego, sendo considerado fundamental nas proximidades de áreas urbanas. Esse tipo de solução foi aderido no Brasil após uma pesquisa desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNIT sobre asfalto-polímero, na década de 1990, por meio de especificações de serviços e recomendado por críticos no assunto (PINTO; PINTO, 2015).

A manutenção da CPA requer limpeza após um curto período de uso, com equipamentos específicos para essa operação. Áreas litorâneas e próximas às fazendas de gado, necessitam uma maior atenção, por possuírem uma grande possibilidade de colmatção dos vazios por impurezas, e conseqüente redução da eficiência de drenabilidade da CPA (PINTO; PINTO, 2015).

O projeto da mistura betuminosa é baseado no procedimento Marshall, complementado pelo ensaio de desgaste de corpos de prova por abrasão no ensaio cântabro (DNER-ME 383/99), desenvolvido na Espanha e também recomendado na pesquisa de asfalto-polímero do Instituto de pesquisas rodoviárias do DNIT, em 1997 e 1998, para esse tipo de mistura aberta drenante (PINTO; PINTO, 2015).



DOI: 10.29327/1430212.49-32

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE GOLPES NA COMPACTAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CPA

O objetivo de deixar a mistura com esses vazios é para que eles possam funcionar como drenos que ligam a água da chuva em contato com o pavimento para o interior do mesmo e assim promover uma redução da espessura da lamina d'água na camada de rolamento. Isso por sua vez, acaba causando outros benefícios como redução das distancias de frenagem, diminuição da reflexão da luz dos faróis noturnos, resultando em redução de acidentes em dias de chuva (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A CPA deve ser executada sobre uma camada de mistura densa, estrutural e impermeável para evitar que a água drenada infiltre no interior da estrutura do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2010). A necessidade de a camada inferior à camada drenante ser estrutural se deve ao fato de que a contribuição estrutural da CPA é muito pequena não podendo essa ficar responsável por suportar o carregamento obtido pelos veículos (KOLODZIEJ, 2016).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar o objetivo do trabalho, foi realizado um experimento com 18 corpos de prova de CPA, sendo divididos em dois grupos, cada um moldado com uma quantidade de golpes diferentes por face: 50 e 75 golpes. A partir dos resultados obtidos, fez-se a análise racional sobre a quantidade de golpes ideal para confecção de misturas do tipo CPA.

Os 18 corpos de prova foram moldados com teor 4,5% de asfalto, 76,4% de agregado graúdo, 14,3% de agregado miúdo e 4,8% de cal hidratada, com os quais determinou-se o volume de vazios, a resistência à tração, o desgaste por abrasão e a granulometria após a extração de betume. O teor de ligante foi adotado com base no trabalho realizado por Andrade (2018), assim como o traço granulométrico para a faixa adotada para o presente trabalho e o cálculo da DMM. Em relação ao teor, verificou-se que o mesmo, junto com o traço granulométrico adotado, seria suficiente para obtenção de vazios que caracterizasse a mistura como porosa. A Figura 1 ilustra o fluxograma da pesquisa.



Figura 1 – Fluxograma empregado na parte experimental do trabalho (Autores, 2018).



Moldagem dos corpos de prova

A composição granulométrica dos agregados se encaixa na faixa I da especificação DNER-ES 386/1999, conforme visto na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Composição granulométrica dos agregados. (Autores, 2018).

Peneira	Porcentagem Passante em massa	
	Especificação Faixa I	Resultados
3/4"	-	100,00
1/2"	100	99,80
3/8"	80 – 100	79,65
4	20 - 40	29,08
10	12 – 20	15,43
40	8 – 14	9,08
80	-	9,08
200	3 – 5	3,90

Os corpos de prova confeccionados pela metodologia de dosagem Marshall, devem apresentar 1200g de massa e 6,35cm de altura, aproximadamente. No entanto, tal especificação só será alcançada para misturas contendo teor de vazios em torno de 4,0%. Em teores elevados, como nas misturas do tipo CPA, para 1200g, não seria possível manter a altura de 6,35cm. Considerando que a altura pode influenciar na execução dos ensaios de caracterização mecânica, optou-se por moldar corpos de prova com massa inferior a especificada na norma Marshall.

Depois de compactado, o corpo de prova foi retirado do molde e colocado sobre superfície lisa e plana, onde permaneceu à temperatura ambiente por, no mínimo, 12 horas. Esse processo foi feito nove vezes para 50 golpes por face e mais nove vezes para 75 golpes por face, resultando em 18 corpos de prova (Figura 2).



Figura 2 – 18 corpos de prova da mistura CPA (Autores, 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ensaio de densidade aparente foi necessário para que fosse possível calcular o volume de vazios, sendo este de grande importância no segmento da camada porosa de atrito afim de se identificar a influência dos golpes. Os dados obtidos no ensaio referente a corpos de prova com 50 e 75 golpes,



DOI: 10.29327/1430212.49-32

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE GOLPES NA COMPACTAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CPA

são expostos nas Tabelas 2 e 3, já os resultados do referido ensaio e do cálculo para a obtenção do volume de vazios para corpos de prova com 50 e 75 golpes podem ser vistos nas Tabelas 4 e 5. Para melhor compreensão das Tabelas, apresenta-se abaixo a legenda utilizada em cada parâmetro obtido.

Dp: densidade aparente da parafina

df: densidade aparente da fita adesiva

Par: peso do corpo de prova, ao ar, em N;

P1: peso do corpo de prova com fita adesiva, em N;

P2: peso da fita adesiva, em N;

P3: peso do corpo de prova com fita adesiva e recoberto com parafina, ao ar, em N;

P4: peso do corpo de prova com fita adesiva e recoberto com parafina, imerso em água, em N.

Tabela 2 – Dados utilizados para cálculo da densidade aparente – 50 golpes (Autores, 2018).

CPA - 50 GOLPES							
Amostra	Par	P1	P2	P3	P4	Df	Dp
CP-01	9031	9089	58	9375	4421	0,97	0,89
CP-02	9028	9089	61	9442	4472	0,97	0,89
CP-03	9100	9159	59	9489	4494	0,97	0,89

Tabela 3 – Resultados de densidade aparente e volume de vazios – 50 golpes (Autores, 2018).

Amostra	CP-01	CP-02	CP-03	Média
Densidade aparente (g/cm ³)	1,97	2	1,99	1,99
Volume de vazios (%)	18,79	17,56	17,97	18,11

Tabela 4 – Dados utilizados para cálculo da densidade aparente – 75 golpes (Autores, 2018).

CPA - 75 GOLPES							
Amostra	Par	P1	P2	P3	P4	df	Dp
CP-01	9031	9087	56	9364	4571	0,97	0,89
CP-02	8981	9037	56	9313	4531	0,97	0,89
CP-03	9013	9065	52	9421	4513	0,97	0,89

Tabela 5 – Resultados de densidade aparente e volume de vazios – 75 golpes (Autores, 2018).

Amostra	CP-01	CP-02	CP-03	Média
Densidade aparente (g/cm ³)	2,04	2,03	2,02	2,03
Volume de vazios (%)	15,91	16,32	16,74	16,3

Como pode ser visto nas tabelas e de posse da densidade máxima medida (DDM) de Andrade (2018) obteve-se os resultados para o volume de vazios, verificando-se que o valor da CPA moldada com 50 golpes é maior que o da CPA com 75 golpes, além disso, visto que o volume



mínimo de vazios para a camada porosa de atrito é 18%, apenas o ensaio realizado com 50 golpes atende ao critério de especificação da norma, pois possui como média o volume de vazios de 18,11%.

As Tabelas 6 e 7 expõem as porcentagens passantes dos agregados depois de sofrer 50 e 75 golpes, respectivamente, demonstrando que a quantidade de golpes não teve influência na granulometria, visto que tiveram uma pequena variação.

Tabela 6 – Porcentagem passante por peneira para 50 golpes (Autores, 2018).

CPA - 50 GOLPES		
Peneiras (n°)	Peneiras (mm)	Passante (%)
3/4"	19	100
1/2"	12,5	98,68
3/8"	9,5	85,70
4	4,8	34,13
10	2	15,04
40	0,42	6,62
80	0,18	4,92
200	0,075	1,14

Tabela 7 – Porcentagem passante por peneira para 75 golpes (Autores, 2018).

CPA - 75 GOLPES		
Peneiras (n°)	Peneiras (mm)	Passante (%)
3/4"	19	100
1/2"	12,5	100
3/8"	9,5	88,86
4	4,8	34,68
10	2	15,32
40	0,42	6,46
80	0,18	4,45
200	0,075	1,58

Na Tabela 8 é observada uma comparação dos resultados obtidos na granulometria de 50 e 75 golpes.

Tabela 8 – Comparação entre as análises granulométricas e as faixas I e II (Autores, 2018).

Peneiras	Faixa I	Andrade	50 golpes	75 golpes	Faixa II
3/4"	-	100	100	100	-
1/2"	100	99,80	98,68	100	100
3/8"	80 – 100	79,65	85,70	88,86	70 - 100
4	20 – 40	29,08	34,13	34,68	20 - 40
10	12 – 20	15,43	15,04	15,32	5 - 20
40	8 – 14	9,08	6,62	6,46	-
80	-	9,08	4,92	4,45	2 - 8
200	3 – 5	3,90	1,14	1,58	0 - 4



DOI: 10.29327/1430212.49-32

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE GOLPES NA COMPACTAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CPA

Quando analisadas os resultados de granulometria, observa-se que houve uma mudança de faixa, da I para II. No entanto, é possível observar que tal reenquadramento não é consequência do número de golpes adotado, e sim, devido à perda de material miúdo durante o ensaio de extração de betume. Com relação à resistência à tração por compressão diametral, os dados obtidos no ensaio para corpos de prova que sofreram 50 golpes e os seus respectivos valores de resistência à tração, podem ser vistos na Tabela 9, assim como os dados e os valores da resistência à tração para 75 golpes, podem ser vistos na Tabelas 10.

Tabela 9 – Resultado do ensaio de resistência à tração – 50 golpes (Autores, 2018).

Amostra	Carga de ruptura (Kgf)	Carga de ruptura (N)	Resistência (Mpa)	Média
CP-04	525,8	5158,10	0,57	0,58
CP-05	541,1	5308,15	0,59	
CP-06	535,36	5251,88	0,58	

Tabela 10 – Resultado do ensaio de resistência à tração – 75 golpes (Autores, 2018).

Amostra	Carga de ruptura (Kgf)	Carga de ruptura (N)	Resistência (Mpa)	Média
CP-04	544,92	5345,67	0,61	0,65
CP-05	558,3	5476,96	0,62	
CP-06	630,96	6189,72	0,72	

As amostras dos corpos de prova com 50 golpes tiveram os resultados com a menor variabilidade e apresentaram os valores mais baixos de resistência à tração; já os resultados com corpos de prova com 75 golpes obtiveram maiores de valores de resistência à tração, possivelmente pelo fato dos corpos de prova possuírem uma maior compactação.

Apesar da variabilidade dos resultados quanto a quantidade de golpes, todas as amostras atenderam ao critério da especificação: resistência à tração por compressão diametral superior a 0,55 MPa.

O ensaio de desgaste por abrasão foi realizado para analisar se haveria diferença no desgaste por abrasão levando em conta a quantidade de golpes que o corpo de prova sofreu. E, como pode ser visto nas Tabelas 11 e 12, apesar dos valores de cada corpo de prova variar de acordo com a quantidade de golpes, a média obtida para cada tipo foi a mesma, demonstrando que a resistência a abrasão não apresentou correlação com a energia de compactação.

Tabela 11 – Dados e resultado do ensaio de desgaste por abrasão – 50 golpes (Autores, 2018).

CPA - 50 GOLPES			
Amostra	CP - 07	CP - 08	CP - 09
Massa inicial (g)	909,1	903,5	903,4
Massa final (g)	718,8	738,19	703
Desgaste (%)	20,9	18,3	22,2
Média do desgaste (%)	20,5		



Tabela 12 – Dados e resultado do ensaio de desgaste por abrasão – 75 golpes (Autores, 2018).

CPA - 75 GOLPES			
Amostra	CP – 07	CP - 08	CP – 09
Massa inicial (g)	899,7	904,8	904,1
Massa final (g)	696,9	697,1	759,3
Desgaste (%)	22,5	22,96	16
Média do desgaste (%)	20,5		

Os dois tipos de corpos de prova com 50 e 75 golpes, atendem ao critério da especificação de serviço: desgaste por abrasão – Ensaio Cântabro máximo de 25%.

Ao observar apenas esse parâmetro, têm-se que é indiferente a escolha entre 50 ou 75 golpes, ficando a critério do engenheiro responsável a escolha.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível perceber que alguns parâmetros sofreram influência da compactação, e outros não. A granulometria foi um dos que se mostrou indiferente ao número de golpes utilizados, concluindo que para o agregado analisado, a energia de compactação não foi capaz de quebrar os grãos graúdos, não aumentando a parcela miúda.

No entanto, quando analisados o volume de vazios e a resistência, observou-se que a energia quanto maior, forneceria corpos de prova com um menor volume de vazios e conseqüentemente, mais resistentes a tração. Com tal análise, conclui-se que é de suma importância a correlação da energia utilizada em laboratório com a energia a ser utilizada em campo, já que os parâmetros laboratoriais devem representar os valores apresentados in situ.

Sendo assim, conclui-se que não é possível preestabelecer o número de golpes a ser utilizado, contrapondo o que vem sendo dito na literatura sobre utilizar-se 50 golpes por face. Na verdade, ambas as energias se mostraram passivas de uso, porém, precisa-se conhecer a energia de campo a ser utilizada, para então, definir o número de golpes em laboratório.

Tão importante quanto definir a energia aplicada pelos rolos compactadores no campo, é dispor de um ensaio que permita aferir a compactidade das misturas asfálticas em laboratório, considerando uma estreita e comprovada relação campo/laboratório. E, neste momento, o melhor procedimento é com a utilização da prensa de compactação giratória, sobretudo a de origem francesa, pois foi testada por longo período em comparação com resultados práticos de campo e laboratoriais. Desse modo, sugere-se a comparação no texto para trabalhos futuros, que englobem dados comparativos com esta outra metodologia de compactação.

Devido as limitações do ensaio de resistência a tração por compressão diametral, que além de ser executado com amostras produzidas a partir de compactação provenientes do soquete Marshall, tem como procedimento de ruptura a tração indireta por compressão diametral, com controle da força, situação que não descreve o real fenômeno que conduz as camadas asfálticas ao colapso estrutural no campo, o qual ocorre a partir de esforços de flexão alternada na passagem dinâmica do carregamento, controlando-se a amplitude da deformação que gradualmente aumenta pela dissipação de energia sobre a forma de calor, sugere-se, para melhor simulação destes esforços em laboratório, a execução de ensaios que permitam solicitar as misturas asfálticas a partir de esforços à flexão alternada e com o controle do deslocamento.



DOI: [10.29327/1430212.49-32](https://doi.org/10.29327/1430212.49-32)

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE GOLPES NA COMPACTAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CPA

O mesmo acontece com as limitações das medições de densidade aparente dos corpos de prova, que nesse trabalho foi realizada por meio de fitas, o que não representam de maneira precisa a realidade em campo, sugerindo-se, então o uso de procedimentos que consigam obter tal medida de maneira direta, como o uso de tomografia computadorizada.

Recomenda-se para pesquisas futuras substituir o ensaio de extração de betume pós-compactação por ensaios do tipo IDM pós-compactação, o que pode ser verificado na norma "DNER-ME 401/99 - Agregados – determinação do índice de degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante – IDML e sem ligante - IDM".

Outro ponto importante, é que a conclusão do presente trabalho é exclusiva para os materiais utilizados e a faixa granulométrica adotada, sendo necessário que outros ensaios, envolvendo outros parâmetros, sejam realizados e analisados.

Devido ao alto teor de vazios nesse tipo de mistura, concluiu-se que não é possível seguir os padrões convencionais de altura e massa para corpos de prova de misturas asfálticas, sendo necessário predefinir a quantidade de massa necessária para que o corpo tenha 63,5mm de altura.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Janaina Ingrid Alves de. **A Eficiência da Camada Porosa de Atrito como Controle do Escoamento Superficial na Fonte**. 2018. 45 p. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil) - Faculdade Pio Décimo, Aracaju, 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7175: **Cal Hidratada para argamassas – requisitos**. Rio de Janeiro, 2003, 4p

_____. NBR 7181: **Solo - análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1998, 16p

_____. NBR 7809: **Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2005, 3p 16p

_____. NBR 15116: **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisito**. Rio de Janeiro, 2004, 12p

_____. NBR 15619: **Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas**. Rio de Janeiro, 2016, 13p.

_____. NBR 16208: **Misturas asfálticas – determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo refluxo duplo**. Rio de Janeiro, 2013, 11p

_____. NBR-NM 23: **Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Norma Mercosul. Rio de Janeiro, 2001, 5p.

_____. NBR-NM 27: **Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Norma Mercosul. Rio de Janeiro, 2001, 7p.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: Materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 558 p.

BERNUCCI, Liede Bariani *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2010. 475 p.



BOCK, André Luiz. **Efeitos da Incorporação de Cal Hidratada em Concretos Asfálticos Elaborados com Ligante convencional e Modificado**. 2012. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BRUXEL, Daiana Frank. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaios de laboratório e de análise de desempenho**. 2015. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

CAVA, Felipe. **Superestrutura Rodoviária – “Stone Matrix Asphalt”**. 2017. Disponível em: <<https://alemdainercia.wordpress.com/2017/11/13/superestrutura-rodoviaria-stone-matrix-asphalt/>>. Acesso em: 17 set. 2018.

COELHO, Ana Zulmira Gomes; TORRAL, F. Pacheco; JALALI, Said. **A Cal na Construção**. Guimaraes: [s.n.], 2009. 132 p.

DNER-ES 386/99: **Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito**. Especificação de Serviço, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1999, 15p.

DNER-ME 035/98: **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1998, 7p.

DNER-ME 043/95: **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1995, 11p.

DNER-ME 054/97: **Equivalente de areia**. Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1997, 10p.

DNER-ME 081/98: **Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1998, 6p.

DNER-ME 083/98: **Agregados – análise granulométrica**. Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1998, 5p.

DNER-ME 084/95: **Agregado miúdo – determinação da densidade real**. Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1995, 3p.

DNER-ME 117/94: **Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente**. Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994, 4p.

DNER-ME 194/98: **Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1998, 4p.

DNER-ME 383/99: **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro**. Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1999, 2p.

DNER-PRO 120/97: **Coleta de amostras de agregados**. Procedimento, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1997, 5p.

DNIT 2006: **Manual de pavimentação**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006, 274p.

DNIT-EM 095/2006: **Cimentos asfálticos de petróleo**. Especificação de Material, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2006, 6p



DOI: [10.29327/1430212.49-32](https://doi.org/10.29327/1430212.49-32)

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE GOLPES NA COMPACTAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CPA

DNIT-ES 031/2006: **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico**. Especificação de Serviço, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2006, 14p

DNIT-ME 136/2017: **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Método de Ensaio, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2017, 9p.

DRESCH, Fernanda. **Comportamento de Misturas Asfálticas tipo Camada Porosa de Atrito (CPA)**. 2016. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

FERNANDES, C.G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e Belo Horizonte para uso em pavimentação**. 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FORTI, Eduardo Zambiasi. **Influência da Cal Hidratada nas Características da Argamassa de Revestimento Realizada em Obra**. 2017. 74 p. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil) - CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES, Lajeado, 2017.

GEWEHR, Juliano. **Concreto x Asfalto**. 2013. Disponível em: <<http://asfaltodequalidade.blogspot.com/2013/01/concreto-x-asfalto.html>>. Acesso em: 17 set. 2018.

HOMEM, Tiago da Rosa. **Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

ANTOSCZEZEM JUNIOR, José Antônio. **Evolução Tecnológica: Desenvolvimento dos revestimentos asfálticos produzidos com asfaltos modificados por polímeros e borracha de pneus no Brasil**. 7. 2012. Disponível em: <<http://sinicesp.org.br/materias/2012/bt07a.htm>>. Acesso em: 12 nov. 2018

KOŁODZIEJ, Vanesa Maria. **Estudo das Propriedades Acústicas, Drenantes e Mecânicas de Revestimentos Asfálticos Porosos**. 2016. 184 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

LIMA, João Ítalo Aragão. **Utilização da Fibra do Bagaço de Cana-de-Açúcar em Mistura Asfáltica do Tipo SMA**. 2017. 63 p. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. 620 p.

NOGUEIRA, Mônica Grassi. **Comparação do comportamento em campo de concretos asfálticos com CAP 30-45 e com CAP 50-70 para revestimentos de pavimentos**. 2008. 170 p. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

OFICINA REGIONAL SUDAMERICANA, 2002, Santa Cruz de la Sierra. **Seminario sobre Mantenimiento de Pavimentos de Aeropuertos y un Curso Rápido sobre la Interacción Aeronave / Pavimento....** Santa Cruz de La Sierra: [s.n.], 2002. 68 p. Disponível em: <<https://www.icao.int/SAM/Documents/2002/APMAPI/CAMADA%20POROSA%20ATRITO1.pdf>>. Acesso em: 16 jul. 2018.

OLIVEIRA, Carlos Gustavo Macedo. **Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante**. Dissertação (Mestrado em Geotécnica). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.



PAIXÃO, Monique Paixão; CORDEIRO, Cristóvão César Carneiro; CORREIA, Maria da Conceição Nogueira. **Pavimentos Semirrígidos: Prevenção e Tratamento da Reflexão de Trincas**. Revista eletrônica SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, Salvador, n. 17, p. 136-157, 2017. Disponível em: <<https://revistas.unifacs.br/index.php/sepa/article/viewFile/4949/3298>>. Acesso em: 03 out. 2018.

PAZOS, Abraham Guerrero; SACRAMENTO, Francisco Thiago; MOTTA, Laura Maria Goretti da Motta. **Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. In: RAPV – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 44, 2015, Foz do Iguaçu. Anais... [S.l.: s.n.], 2015. p. 1-13.

PINTO, Salomão; PINTO, Isaac Eduardo. **Pavimentação asfáltica: conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos**. Rio de Janeiro: Grupo Editora Nacional, 2015.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro: Synergia, 2010.

ROSENO, Jôfran Lima. **Avaliação de uma mistura asfáltica porosa com agregados calcários e asfalto-borracha**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

SCHNEIDER, Daniel. **Determinação do Teor de Asfalto para Enquadramento de uma Mistura Asfáltica Aberta como Camada Porosa de Atrito**. 2016. 78 p. Dissertação (Bacharel em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2016.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação: volume 1**. 1 ed. São Paulo, Editora Pini, 2007. 779p.

SILVA, P. B., **Estudo em Laboratório e em Campo de Misturas Asfálticas SMA 0/8S**. Dissertação de M.Sc., POLI, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2005.

TAVARES, Diogo. **Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica do tipo SMA com agregado siderúrgico**. 2012. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

WINTER, Bruno. **Acompanhamento da obra de pavimentação asfáltica do acesso sul de São Joao do Cerrito**. 2016. 33 p. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Planalto Catarinense, Santa Catarina, 2016.

ZAGONEL, Ana. **Inovações em Revestimentos Asfálticos utilizados no Brasil**. 2013. 115 p. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade do Regional do Noroeste do Estado Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.



ASFALTO REJUVENESCIDO BENEFICIADO A FRIO PARA USO EM OPERAÇÃO TAPA BURACOS

*José Rodolfo Rodrigues¹
Renata Monte²*

RESUMO

O processo de pavimentação utilizado no Brasil atualmente em sua grande maioria consiste na pavimentação asfáltica, sendo utilizado o cimento asfáltico de petróleo (CAP) como matéria prima principal para a execução do concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) utilizando grande demanda energética em sua usinagem. No processo de manutenção, normalmente é feita a fresagem do material deteriorado e aplicação de nova camada de CAUQ no trecho solicitado. O material fresado, contendo a porcentagem do CAP aplicado inicialmente tem sido descartado, e até mesmo um problema para a estocagem / descarte. Diante disso, o intuito deste estudo é avaliar a eficiência do asfalto reciclado, oriundo da mistura do RAP (reclaimed asphalt pavement) e um rejuvenescedor, reativando as características iniciais do CAP e aplicação na operação tapa buracos na cidade de São Paulo / SP.

PALAVRAS-CHAVE: asfalto rejuvenescido; rejuvenescedor; asfalto frio; RAP; tapa buracos; pavimentação; reparos.

ABSTRACT

The paving process used in Brazil currently mostly consists of asphalt paving, using petroleum asphalt cement (CAP) as the main raw material for the execution of hot-machined asphalt concrete (CAUQ) using great energy demand in its machining. During the maintenance process, the damaged material is normally milled and a new layer of CAUQ is applied to the requested section. The milled material, containing the percentage of CAP initially applied, has been discarded, and even a problem for storage/disposal. Therefore, the purpose of this study is to evaluate the efficiency of recycled asphalt, derived from the mixture of RAP (reclaimed asphalt pavement) and a rejuvenator, reactivating the initial characteristics of CAP and application in the pothole filling operation in the city of São Paulo / SP.

KEY WORDS: rejuvenated asphalt; rejuvenating; cold asphalt; RAP; fill holes; paving; repairs.

¹ Engenheiro Civil da Concremat Engenharia e Tecnologia S/A, Mestrando em Inovação na Construção Civil - USP, jose.rodolfo@concremat.com.br, ² Professora Doutora, Departamento de Engenharia de Construção Civil – USP, renata.monte@usp.br



Caracterização do Objeto do Estudo

O estudo de caso trata da avaliação do uso de “Asfalto Rejuvenescido Beneficiado a Frio” na operação tapa buraco do município de São Paulo / SP. Realizado pela Concremat Engenharia e Tecnologia S/A, em parceria com o Departamento de Zeladoria Urbana – DZU da Prefeitura Municipal de São Paulo – PMSP.

Processo de Pavimentação

Os processos e materiais utilizados atualmente no Brasil, sejam urbanos ou rodoviários, são na sua grande maioria do tipo flexível com utilização de materiais asfálticos oriundos do petróleo em processos envolvendo grandes usinas e processos com altas temperaturas e grande demanda energética. O concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) nada mais é que a mistura de agregados minerais e cimento asfáltico de petróleo (CAP) em proporções previamente estipuladas. Com o passar do tempo, com a oxidação do CAP, o pavimento vai perdendo suas características originais, passando a não suportar mais as cargas e deformações solicitadas, sendo necessário a manutenção.

A grande maioria dos processos de manutenção de pavimentos asfálticos consiste na fresagem (retirada) da camada asfáltica aplicada e recomposição por uma nova camada de rolamento. Esse material retirado, normalmente por fresadoras de grande ou pequeno porte, é chamado de RAP (reclaimed asphalt pavement ou pavimento asfáltico recuperado).

O destino final do RAP tem sido um problema para descarte adequado, podendo ser notado grandes estoques ao longo de rodovias ou pilhas de grandes dimensões encontradas nas grandes cidades.

O RAP ainda contém a parcela de CAP utilizada na produção do CAUQ original, material nobre utilizado como ligante dos agregados e que permite que o asfalto tenha a durabilidade e capacidade de suporte conhecidos.

Processo de Beneficiamento

Para o processo de beneficiamento do RAP e obtenção da mistura final, procedeu-se as seguintes etapas:

- Britagem do RAP, caso apresente torrões ou diâmetros muito maiores que o traço desejado;
- Classificação do RAP de acordo com a granulometria pretendida. No caso deste teste, o material passou pela peneira $\frac{3}{4}$ ” para enquadrar mistura da Faixa IV da PMSP;
- Ensaio para obtenção de teor de betume do RAP;
- Mistura em betoneira do RAP com aditivo conforme especificações do fabricante;
- Aguardar tempo de cura conforme especificações do fabricante;
- Aplicação.

DOI: [10.29327/1430212.49-18](https://doi.org/10.29327/1430212.49-18)

ASFALTO REJUVENESCIDO BENEFICIADO AFRIO PARA USO EM OPERAÇÃO TAPABURACOS

Aditivo Rejuvenecedor

No estudo foram avaliados aditivos rejuvenescedores de 2 fabricantes distintos, seguindo orientações e especificações de cada produto. Os aditivos foram denominados A e B, com as informações da mistura apresentados a seguir.

Aditivo Fabricante “A”

- RAP utilizado com 5,4% de teor de betume;
- Usado 3,75% de aditivo em relação ao peso do RAP (foi desconsiderado o teor de betume conforme orientações do fabricante).

Aditivo Fabricante “B”

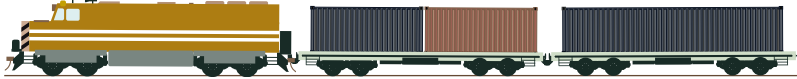
- RAP utilizado continha 5,5% de teor de betume;
- Foi utilizado 25% de aditivo em relação ao peso do CAP.

A Tabela 1 apresenta os resultados de ensaios obtidos com a mistura reciclada utilizando o aditivo rejuvenecedor do fabricante A.

Material	Percentual Aditivo sobre o RAP	Ensaio Marshall DNER ME 43/95		Resistência à Tração por Compressão Diâmetral DNIT ME 136/2018 (MPa)
		Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	
Idade 0 Dias				
Mistura Asfáltica	3,75%	-	-	-
Idade 10 Dias				
Mistura Asfáltica	3,75%	1,8	5,3	0,25
Idade 30 Dias				
Mistura Asfáltica	3,75%	2,2	5,3	0,3

Tabela 1 – Ensaios mecânicos da mistura reciclada (Fabricante “A”).

A Tabela 2 apresenta os resultados de ensaios obtidos com a mistura reciclada utilizando o aditivo rejuvenecedor do fabricante B.



Material	Percentual Aditivo Sobre o CAP	Ensaio Marshall DNER ME 43/95		Resistência à Tração por Compressão Diâmetral DNIT ME 136/2018 (MPa)
		Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	
Idade 0 Dias				
Mistura Asfáltica	25%	1,7	5,1	0,27
Idade 10 Dias				
Mistura Asfáltica	25%	2,0	5,1	0,27
Idade 30 Dias				
Mistura Asfáltica	25%	2,8	4,3	0,30
Idade 60 Dias				
Mistura Asfáltica	25%	3,2	3,9	0,36

Tabela 2 – Ensaio mecânicos da mistura reciclada (Fabricante “B”)

Estudo de Caso

Paralelamente às análises dos materiais em laboratório foi realizada a aplicação do material beneficiado em reparos de duas vias do município de São Paulo.

Aplicação de Mistura Beneficiada com aditivo Fabricante “A”

A equipe da Zeladoria Urbana da SMSUB selecionou um reparo na Avenida Cruzeiro do Sul, altura do nº 190, via com grande fluxo de veículos para execução, conforme critérios usados na operação tapa-buraco da cidade de São Paulo, trocando a mistura asfáltica comumente usada para esta operação (Faixa IV PMSP) pelo asfalto beneficiado a frio objeto deste relatório.

As Figuras 1 a 3 ilustram as etapas do procedimento de execução dos reparos.



[DOI: 10.29327/1430212.49-18](https://doi.org/10.29327/1430212.49-18)

ASFALTO REJUVENESCIDO BENEFICIADO AFRIO PARA USO EM OPERAÇÃO TAPABURACOS



Figura 1 - Execução da pintura de ligação para realização do reparo com a mistura asfáltica com o aditivo A.



Figura 2 - Aplicação de mistura asfáltica beneficiada a frio com com o aditivo A.



Figura 3 - Compactação com rolo compactador vibratório.

A aplicação da mistura asfáltica beneficiada com o aditivo do Fabricante A apresentou um bom acabamento superficial, porém foi observado indícios de desagregação logo após a compactação. Após a liberação do tráfego o material prosseguiu no processo de desagregação, não apresentando resistência mínima necessária para operação e foi completamente removido.

Aplicação de Mistura Beneficiada com aditivo Fabricante “B”

Para essa aplicação foi selecionado um reparo no interior do pátio da Zeladoria Urbana (DZU) localizado na Avenida Ana Pappini Guaranha, 69, entrada do pátio e passagem de caminhões para carga e descarga, para exceção conforme critérios usados na operação tapa-buraco da cidade de São Paulo, trocando a mistura asfáltica comumente usada para esta operação (Faixa IV PMSP) pelo asfalto beneficiado a frio objeto deste relatório.

Nas Figuras 4 a 6 podem ser observadas as etapas do procedimento de execução dos reparos.



[DOI: 10.29327/1430212.49-18](https://doi.org/10.29327/1430212.49-18)

ASFALTO REJUVENESCIDO BENEFICIADO AFRIO PARA USO EM OPERAÇÃO TAPABURACOS



Figura 4 - Execução da pintura de ligação para realização do reparo com a mistura asfáltica com o aditivo B.



Figura 5 - Aplicação de mistura asfáltica beneficiada a frio com o aditivo B.



Figura 6 - Compactação com rolo compactador vibratório.

O reparo realizado com a mistura asfáltica beneficiada com o aditivo do Fabricante B resultou características muito similares com o CAUQ, não sendo observado desagregação de material. O pavimento foi liberado para o tráfego na sequência e segue em operação.

Considerações finais

Neste estudo foram avaliadas duas misturas asfálticas produzidas por reciclagem a frio com dois aditivos rejuvenescedores fornecidos por dois fabricantes. Após a realização de ensaios de caracterização básica das misturas essas foram utilizadas para reparos em duas vias da cidade de São Paulo. Os resultados mostraram que o reparo realizado com a mistura asfáltica produzida com o aditivo rejuvenescedor do Fabricante “A” desagregou após a compactação e o reparo precisou ser removido. Já a mistura produzida com o aditivo rejuvenescedor do Fabricante “B” apresentou resistência superior, logo após o beneficiamento e aplicação, com maior nível de estabilidade ao longo do tempo de acompanhamento. O uso de misturas asfálticas recicladas a frio com aditivo rejuvenescedor é uma alternativa promissora, especialmente pelo ganho ambiental que proporciona. No entanto, ainda carece de estudos com mais aditivos rejuvenescedores disponíveis no mercado e variação dos teores aplicados. Além disso, estudos com foco no desenvolvimento de sistemas de controle tecnológico do material são fundamentais para assegurar qualidade na aplicação.



[DOI: 10.29327/1430212.49-18](https://doi.org/10.29327/1430212.49-18)

ASFALTO REJUVENESCIDO BENEFICIADO AFRIO PARA USO EM OPERAÇÃO TAPABURACOS

Referências Bibliográficas

Balbo, J.T. Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

Ceratti, J.A.T. Manual de dosagem de concreto asfáltico. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

Senço, W. Manual de técnicas de pavimentação. 2. ed. Vol. 1 São Paulo: PINI, 2007

Senço, W. Manual de técnicas de pavimentação. Vol. 2 São Paulo: PINI, 2001

Pessoa, E.J. Manual de obras rodoviárias e pavimentação urbana. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.



ANÁLISE DE CONCRETO ASFÁLTICO ESTOCÁVEL PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Arthur Henrique Moizinho¹; Kássio Gomes Fialho¹ & Joel Carlos Moizinho²

RESUMO

A pesquisa buscou avaliar a composição e as características físicas e mecânicas de um concreto asfáltico estocável a frio – CAE (indicado pelo fabricante para ser empregado em operações tapa buraco). Foram realizados ensaios visando a retroanálise da composição da mistura por meio da extração do ligante asfáltico, determinando-se a granulometria e porcentagem de ligante empregado. Para conhecimento das características volumétricas, estabilidade e resistência à tração diametral foram moldados 33 corpos de provas, seguindo a metodologia Marshall. A mistura CAE apresentou granulometria próxima a faixa C, com diâmetro máximo de 4,75mm e teor de ligante em torno de 5,5%. Os resultados de estabilidade Marshall não atenderam aos parâmetros estabelecidos pela norma DNIT 031:2006 – ES, sendo 33,5% inferior aos esperados para um concreto asfáltico. Com relação a resistência à tração por compressão diametral, não foi atendido o valor mínimo de 0,65 MPa, recomendado pela citada especificação. A mistura pesquisada apresentou resistência à tração média de 0,07 MPa e 0,08 MPa, respectivamente, para zero (0) e noventa (90) dias de cura ao ar livre, o que representa apenas 12,3 % do valor mínimo de referência. O Concreto Asfáltico Estocável estudado não apresentou requisitos mínimos exigidos para serviço de pavimentação. A pouca influência do tempo de cura nos resultados obtidos para resistência à tração diametral, sugere uma inadequação na dosagem do aditivo retardador de pega e questionamentos, se este deixará de agir após a compactação. Portanto, há necessidade de se estudar com mais rigor as misturas do tipo CAE, pois esta não se comporta como um concreto asfáltico convencional de acordo com a metodologia Marshall, como prometem o fabricante, mesmo para serviços de tapa buraco.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto estocável; Cura de CAE; CAE Tapa buraco.

ABSTRACT

The research aimed to evaluate the composition and the physical and mechanical characteristics of a cold stockpiled asphalt concrete (CAE), which the manufacturer indicated for use in pothole repair operations. Tests were conducted to perform a retroanalysis of the mixture's composition through the extraction of the asphalt binder, determining the granulometry and the percentage of binder used. To ascertain the volumetric characteristics, stability, and tensile strength, 33 specimens were molded following the Marshall methodology. The CAE mixture exhibited a granulometry close to grade C, with a maximum diameter of 4.75mm and a binder content of approximately 5.5%. The results of the Marshall stability tests did not meet the parameters established by the DNIT 031:2006 – ES standard, being 33.5% lower than those expected for asphalt concrete. Regarding the tensile strength by diametral compression, the minimum value of 0.65 MPa recommended by the aforementioned specification was not met. The researched mixture showed an average tensile strength of 0.07 MPa and 0.08 MPa for zero (0) and ninety (90) days of air curing, respectively, representing only 12.3% of the minimum reference value. The studied Cold Stockpiled Asphalt Concrete did not meet the minimum requirements for paving service. The minimal influence of the curing time on the tensile strength results suggests an inadequacy in the dosage of the set retarder additive, raising questions about whether it will cease to act after compaction. Therefore, there is a need for more rigorous studies on CAE-type mixtures, as this does not behave like conventional asphalt concrete according to the Marshall methodology, contrary to the manufacturer's claims, even for pothole repair services.

KEY WORDS: Storable concrete; CAE curing; CAE pothole repair.

¹ Mestrandos do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, ahmoizinho@hotmail.com; kassiogf@hotmail.com.

² Professor Titular da Universidade Federal de Roraima, joel.moizinho@ufr.br.



DOI: [10.29327/1430212.49-38](https://doi.org/10.29327/1430212.49-38)

ANÁLISE DE CONCRETO ASFÁLTICO ESTOCÁVEL
PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

INTRODUÇÃO

De acordo com o CNT (2023), o Brasil possui 213 mil quilômetros de rodovias pavimentadas, porém somente 43,2% estão em condições consideradas boas ou ótimas. Essa avaliação é resultado da análise das patologias encontrados nas rodovias brasileira, e dentre os defeitos encontrados na camada de revestimento dos pavimentos estudados estão presentes afundamentos e buracos. Tais patologias, exigem manutenções e restaurações nos pavimentos para que o conforto e segurança das vias sejam mantidos.

Dentre os diversos tipos de revestimentos em pavimentação rodoviária, o mais comum é o Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CA), uma mistura íntima de agregados e ligante asfáltico, devidamente dosado, feita em usina, com rigoroso controle de granulometria, teor de ligante asfáltico, temperaturas do agregado e do ligante, transporte, aplicação e compressão (SENÇO, 2007).

Tendo em vista essas exigências quanto a aplicação, transporte e temperatura do CA, cria-se uma problemática quanto a viabilidade técnica e econômica para seu uso em áreas remotas do País, onde não há fácil acesso as usinas de concreto asfáltico. Essa problemática fica ainda mais evidente quando se trata de obras de manutenção e restauração, onde a quantidade do concreto a ser produzido, aplicado e transportado é baixa, mas a mão-de-obra especializada, o maquinário e o controle de qualidade alto ainda devem ser seguidos, fazendo com que a viabilidade econômica fique ainda mais comprometida.

Com o objetivo de melhorar economicamente, tecnicamente e ambientalmente os materiais usados na camada de revestimento de pavimentos rodoviários, nos últimos anos iniciou-se estudos de asfaltos alternativos. Foram estudados materiais como Asfalto Reciclado (AR) por Oreškovic *et al.* (2020), Asfalto Modificado com Polímero por Polacco *et al.* (2015), o Asfalto Pré-Misturado a Frio (PMF) e Asfalto Borracha (AB) por Novo Junior *et al.* (2021) e, neste contexto, este artigo se propõe a analisar o Concreto Asfáltico Estocável (CAE).

Segundo Carvalho (2020), o CAE, que também pode ser chamado de Asfalto Instantâneo, é uma alternativa de material para uso em camadas de revestimento e tem sua produção semelhante ao Concreto asfáltico usual. Ele é produzido a quente em usina e, no fim do processo é embalado para venda. A diferença em relação do CAE em relação ao Concreto asfáltico tradicional, é que se utiliza um aditivo polimérico misturado ao ligante para que não ocorra a cura do concreto, até que ele seja retirado da embalagem, permitindo assim que o CAE seja aplicado a frio. Por não necessitar que a mistura esteja quente, a aplicação do CAE é bastante simples, podendo ser vendido em pequenas quantidades, e o transporte pode ser feito em veículos pequenos, facilitando sua utilização.

Todas essas vantagens, posicionam o CAE como uma boa alternativa para o uso em manutenção de pavimentos rodoviários, como, por exemplo, na forma de tapa-buracos, uma vez que pode ser aplicado em qualquer clima, com liberação da via de forma imediata, sem máquinas pesadas e cuja densificação é feita pelo próprio tráfego.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Santana e Lourenço (2017) estudaram 3 misturas de CAE de diferentes fornecedores, a primeira mistura foi feita com CAP 50/70 modificado com retardador de cura, a segunda foi uma mistura de CAP com pedra britada e com adição de resíduos sólidos de pneus e a terceira foi uma mistura de CAP com aditivo que reveste o material e que quando rompido propicia boas características



mecânicas a mistura. Essa última mistura foi analisada em dois lotes diferentes. Os autores realizaram ensaios de caracterização e ensaios mecânicos para avaliar a adequação das misturas as normas vigentes. No ensaio de extração de ligante atestou-se que a mistura 2 e a mistura 3 do primeiro lote estavam com teor acima do limite máximo permitido pelo DNIT. A análise granulométrica mostrou que nenhuma das amostras se encaixou na faixa “C” do DNIT e nem nos parâmetros da metodologia Superpave. Ainda na etapa de caracterização, os autores constataram que nenhuma das amostras tem os teores de vazios entre 3% e 5%, como exigidos pelo DNIT. Já em relação a parte mecânica, a estabilidade Marshall e a resistência à tração por compressão diametral das amostras ficaram muito abaixo do mínimo estabelecido para concretos asfálticos. Os autores ainda observam que, para a amostra 3, houve grande variação nos valores obtidos nos ensaios mecânicos e volumétricos, sugerindo que não há rigor na fabricação das misturas.

Araújo *et al.* (2021) fizeram uma análise granulométrica, volumétrica e mecânica do CAE comercializado no estado da Bahia. O teor de ligante encontrado nas amostras de CAE se adequou com o mínimo exigido em norma para o concreto asfáltico, todavia a curva granulométrica do material granular da mistura não se encaixou na faixa “C” estabelecida pelo DNIT para concretos asfálticos. Nos ensaios mecânicos, feitos aplicando a metodologia Marshall, a mistura foi comparada com uma amostra de controle e de um Pré Misturado a Frio (PMF), onde se pode observar que o CAE apresentou valores de estabilidade bem abaixo quando comparado com o concreto asfáltico a quente, mas os valores ficaram próximos do encontrado no PMF. Os autores ainda estudaram a influência da idade de estocagem da mistura na sua estabilidade e resistência a tração, sendo observado uma diminuição dos parâmetros mecânicos da amostra com o envelhecimento da mistura.

Rezende *et al.* (2019) estudaram amostras de CAE pela metodologia Superpave, aquecidas para compactação a 60 °C em duas idades diferentes, 0 (zero) e 30(trinta) dias de cura ao ar livre, sem imposição de cargas. Para caracterização das misturas foram feitos ensaio de extração de ligante e distribuição granulométrica, observou-se que o teor de ligante se encaixou no mínimo exigido pelas normas, já o material granular da mistura atendeu a faixa “C” do DNIT. Na análise de resistência, foram feitos ensaios mecânicos de resistência à tração e de módulo de resiliência. Para a resistência à tração não houve grande variação entre as amostras sem cura e com 30 dias de cura, e ambas ficaram muito abaixo do mínimo exigido para um concreto asfáltico. Em relação ao módulo de resiliência os autores afirmam que os valores encontrados estão dentro do esperado, de acordo com valores típicos para MR.

Huang (2020) estudou pela metodologia Marshall, a influência da compactação e da densidade da mistura de CAE na resistência do material. Para compactação foram usadas 3 metodologias: na A as amostras foram compactadas na temperatura ambiente, na B fez-se a aplicação de 50 golpes de cada lado na temperatura ambiente e depois a mistura foi aquecida a 110 °C e submetida a mais 25 golpes de cada lado do corpo de prova, e por fim, na C as amostras foram compactadas a temperatura de 135 °C. Os resultados demonstraram que as amostras compactadas a maiores temperaturas, resultaram em maiores valores de estabilidade Marshall. Além disso, foram estudadas misturas CAE densas e com estrutura aberta, e nesses casos os autores relataram que misturas densas se sobressaíram em relação a misturas com estrutura aberta.

OBJETIVO DA PESQUISA

A pesquisa procurou avaliar a composição de uma mistura de CAE, vendida comercialmente, por meio da extração do ligante, usando o método rotárex e analisar seguindo a metodologia Marshall às



DOI: [10.29327/1430212.49-38](https://doi.org/10.29327/1430212.49-38)

ANÁLISE DE CONCRETO ASFÁLTICO ESTOCÁVEL PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

características volumétricas da mistura, tais como: densidade, volume de vazios e relação betume-vazio de amostras com e sem cura, além da resistência à tração, comparando com valores mínimos exigidos pela especificação DNIT ES 031:2006.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado na pesquisa está apresentado na Figura 1. O estudo foi dividido em quatro etapas principais: preparação das amostras, caracterização física, preparação dos corpos de prova e caracterização mecânica. As análises foram realizadas no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação do Núcleo de Pesquisa em Engenharia (NUPENG) da Universidade Federal de Roraima.



Figura 1. Concreto Asfáltico Estocável a granel (MOIZINHO, 2024).

Foram pesquisadas amostras de Concreto Asfáltico Estocável a granel, oriunda de um fornecedor anônimo, fornecidas em sacos de 25kg e adquirida em site comercial. Segundo os fabricantes, os agregados estavam classificados na Faixa C da ES 031:2006 proposta pelo DNIT e cujo ligante é o CAP 50/70. O CAE foi retirado das embalagens, destorroadas antes da realização dos ensaios previstos. Os agregados analisados foram obtidos a partir da extração do ligante das amostras de CAE, seguindo os procedimentos estabelecidos na norma DNER ME 053:1994.

Para a realização do ensaio de extração de ligante, foram separadas duas amostras do material. A extração do ligante foi feita a partir da utilização do método Rotárex (Figura 2.a e 2.b) e o uso de um solvente (Querosene).



(a)



(b)

Figura 2. (a) Extração de ligante pelo método do Rotárex e (b) centrífuga usada no ensaio. (MOIZINHO, 2024).



Após a extração do ligante, a caracterização física dos agregados das amostras de CAE foi conduzida. Extraído todo o ligante, a amostra com os agregados foi levada a estufa para posterior caracterização física dos agregados (absorção, massa específica real e aparente), conforme a Figura 3. A análise granulométrica do material foi realizada com o objetivo de verifica-se a faixa granulométrica do material, segundo DNIT ES 031:2006.



Figura 3. Material granular após a extração de ligante. (MOIZINHO, 2024).

De acordo com a especificação DNIT ES 031:2006, a mistura deve respeitar as tolerâncias no que diz respeito à granulometria, estando dentro dos limites de uma das faixas (A, B ou C), de acordo com os dados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Faixas granulométricas do DNIT para Concreto asfáltico. (DNIT, 2006)

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95-100	100	-	± 7%
1"	25,4	75-100	95-100	-	± 7%
3/4"	19,1	60-90	80-100	100	± 7%
1/2"	12,7	-	-	80-100	± 7%
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	± 7%
Nº 4	4,8	25-50	28-60	44-72	± 5%
Nº 10	2	20-40	20-45	22-50	± 5%
Nº 40	0,42	10-30	10-32	8-26	± 5%
Nº 80	0,18	5-20	8-20	4-16	± 3%
Nº 200	0,075	1-8	3-8	2-10	± 2%
Asfalto solúvel no CS₂ (+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Blinder)	4,5 - 7,7 Camada de ligação e rolamento	4,0 - 7,0 Camada de rolamento	± 0,3%



DOI: 10.29327/1430212.49-38

ANÁLISE DE CONCRETO ASFÁLTICO ESTOCÁVEL
PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Para avaliar a composição das misturas asfálticas, física e mecanicamente, foram produzidos 33 corpos de prova. A mistura preparada com 1200g atendeu aos critérios da média estipulada pela ES 031:2006 do DNIT. A Figura 4 mostra os corpos de prova resultantes da moldagem do Concreto asfáltico estocável. A Tabela 2 detalha os testes realizados e a quantidade de corpos de prova fabricados, conforme a metodologia Marshall.

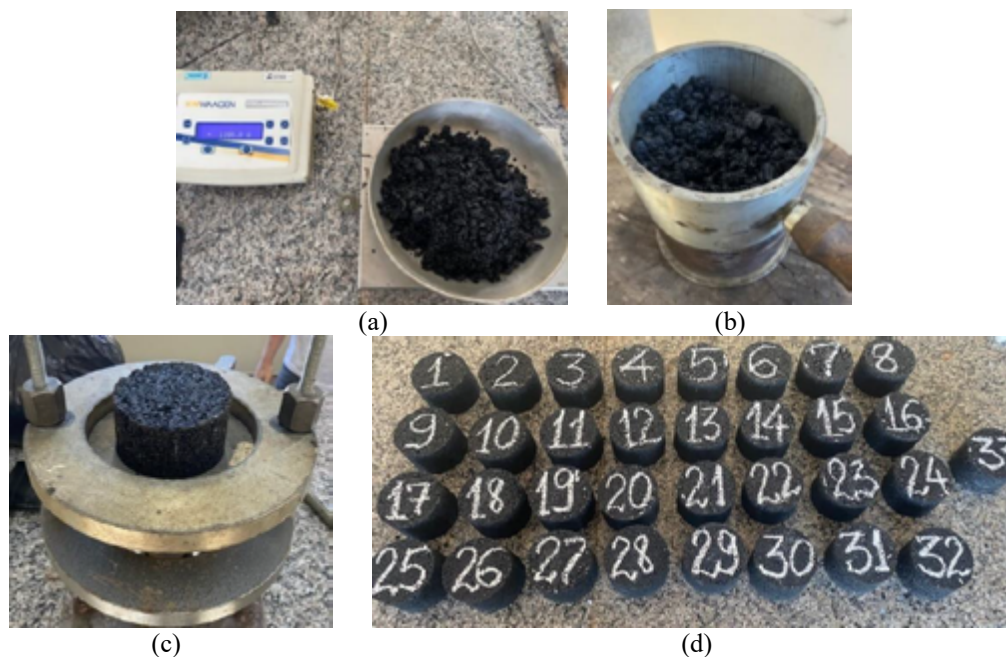


Figura 4. (a) Pesagem da amostra, (b) moldagem dos corpos de prova, (c) extração dos CPs, (d) corpos de provas usados na pesquisa. (MOIZINHO, 2024).

Tabela 2. Ensaios mecânicos para caracterização de misturas asfálticas. (MOIZINHO, 2024)

Ensaio	Norma Técnica	Número de amostras
Ensaio Marshall	DNER-ME 043/95	10
Resistência a tração por compressão diametral (sem cura)	DNIT-ME 136/2018	10
Resistência a tração por compressão diametral (90 dias de cura)	DNIT-ME 136/2018	10

As amostras de massa estocável (já misturadas) foram pesadas (1200g) e compactadas a frio em temperatura ambiente.

Para calcular os parâmetros Marshall, como o volume de vazios, a relação betume-vazios, a estabilidade e a fluência, os corpos de prova foram pesados em temperatura ambiente e imersos em água para determinar a densidade aparente e os vazios das misturas.

A caracterização mecânica da mistura estocável foi conduzida utilizando a metodologia Marshall para concreto asfáltico (CA) conforme descrito em DNER (1995). Os corpos de prova (CPs) foram compactados com 75 golpes em cada face, totalizando 10 CPs. As amostras destinadas aos ensaios



de concreto asfáltico foram submetidas à ruptura na prensa Marshall após o total resfriamento e pré-aquecimento a 60°C durante duas horas em estufa.

Os corpos de provas moldados a frio, foram divididos em dois grupos: aqueles que seriam ensaiados de imediato (10 CPs) e aquele que seriam ensaiados com 90 dias de cura ao ar livre (10 CPs). O objetivo de tal diferenciação foi verificar se ao longo dos dias haveria alguma mudança de comportamento do CAE, devido ao aditivo retardador de pega presente, contudo entende-se que a melhor maneira de representar a cura que o material enfrentaria em campo seria com ela exposta a intempéries e, se possível, submetido a cargas móveis.

Para calcular a resistência à tração, foram registradas as medidas do diâmetro e da altura em quatro posições diametralmente opostas nos corpos de prova, e a média dessas medidas foi utilizada para os cálculos. Os corpos de provas foram rompidos na temperatura ambiente (25°C).

A carga necessária para produzir o rompimento do corpo de prova foi ajustada de acordo com sua altura multiplicando-a pelo fator de correção, conforme determinado pela Equação 1.

$$f = 927,23 * h^{-1,64} \quad (1)$$

Em que: f: fator; h: altura do corpo de prova, em cm.

A resistência a tração foi determinada por meio da equação 2.

$$RT = \frac{2 * F}{100 * \pi * D * H} \quad (2)$$

Em que: RT = Resistência a tração (MPa) F= Força de rompimento do corpo de prova (N); D= Diâmetro médio do corpo de prova (mm); H = Altura média do corpo de prova (mm).

As Figuras 5.a e 5.b mostram, respectivamente, aspectos da realização dos ensaios de estabilidade Marshall e resistência à tração da mistura pesquisada.



(a)



(b)

Figura 5. (a) Prensa de resistência à tração e (b) Prensa Marshall. (MOIZINHO, 2024).



DOI: 10.29327/1430212.49-38

ANÁLISE DE CONCRETO ASFÁLTICO ESTOCÁVEL
PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

RESULTADOS

A Tabela 3 mostra as faixas granulométricas A, B e C recomendadas pela ES 031:2006 do DNIT para misturas asfálticas, junto com a composição granulométrica obtida por peneiramento da mistura de agregados obtida após a extração do ligante. O resultado representa a média de duas determinações.

Tabela 3. Faixas granulométricas do DNIT e da mistura ensaiada. (Adaptada de DNIT, 2006).

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando				
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias	Valor Obtido
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	± 7%	98,29
Nº 4	4,8	25-50	28-60	44-72	± 5%	74,36
Nº 10	2	20-40	20-45	22-50	± 5%	47,22
Nº 40	0,42	10-30	10-32	8-26	± 5%	19,35
Nº 80	0,18	5-20	8-20	4-16	± 3%	11,12
Nº 200	0,075	1-8	3-8	2-10	± 2%	5,35

Ao analisar os dados da Tabela 3 observa-se, que a granulometria da mistura de agregados está mais alinhada com a faixa C recomendada pela ES 031:2006 do DNIT, apresentando um tamanho nominal de 4,75 mm, diferindo da indicada na especificação citada, que é de 9,5mm. A Figura 6 mostra a curva granulométrica da mistura de agregados e a relação com os limites inferior e superior da faixa C mencionada.

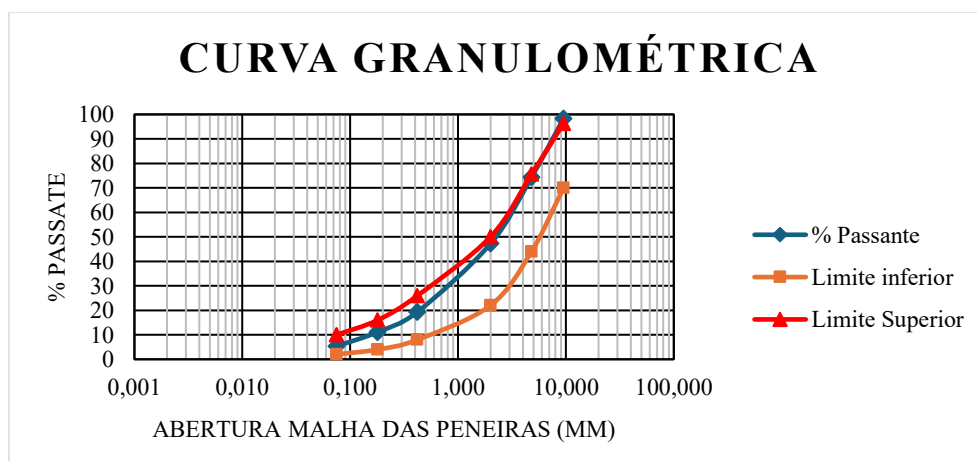


Figura 6. Curva granulométrica dos agregados. (MOIZINHO, 2024).

A granulometria sugere que a mistura CAE pesquisada é do tipo densa, sugestiva a aplicação em rodovias de tráfego médio a pesado.

Os valores dos teores de ligante na mistura estocável, determinados por meio do método Rotárex, são exibidos na Tabela 4.



Tabela 4. Resultados do método Rotárex. (MOIZINHO, 2024).

Método Rotárex				
Amostra	Massa da amostra (g)	Massa após extração (g)	Massa do ligante (g)	% do ligante extraído
1	1200	1132,6	67,4	5,62
2	1200	1135,1	64,9	5,41
MÉDIA				5,51

Da Tabela 4, nota-se que os teores medidos utilizando o método Rotárex mostram-se bastante similares para cada corpo de prova avaliado. Todos os teores medidos nos CPs ensaiados estão dentro dos limites estabelecidos pela especificação DNIT 031:2006 para concreto asfáltico, que varia de 4,5% a 9%. Inclusive, com resultados semelhantes aos apresentados por Barroso (2018) com 5,6% e Prudente (2015) com 5,3%. Entretanto, é necessário ressaltar que este teor está acrescentado de aditivo retardador de pega, muito embora imagine-se que este seja em baixa quantidade.

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos a partir do ensaio de estabilidade Marshall para os corpos de prova pesquisados.

Tabela 5. Resultados do ensaio de estabilidade Marshall. (MOIZINHO, 2024).

Ensaio Marshall					
Corpo de Prova	V.v	V.C.B	V.A.M.	R.B.V.	Estabilidade
	Porcentagem de vazios (%)	Vazios cheios com betume (%)	Vazios do agregado mineral (%)	Relação Betume-Vazios (%)	Corrigida (kgf)
1	4,57	12,40	16,97	73,06	366,70
2	5,90	12,23	18,12	67,47	306,71
3	5,39	12,29	17,68	69,52	299,17
4	4,92	12,36	17,27	71,53	269,11
5	4,49	12,41	16,90	73,42	275,73
6	5,40	12,29	17,69	69,47	261,85
7	6,15	12,20	18,35	66,48	307,60
8	3,50	12,54	16,04	78,17	356,36
9	4,11	12,46	16,57	75,19	372,82
10	5,41	12,29	17,70	69,44	269,33
MÉDIA	4,98	12,43	16,77	74,27	332,84

A porcentagem de vazios (4,98%), bem como a relação betume vazios (74,27%) do CAE pesquisado, atenderam a especificação DNIT ES 031:2006, que menciona, para camada de rolamento, que o concreto asfáltico deve possuir um percentual de vazios entre 3 e 5%. Já para camada de ligação, esse percentual deve ficar entre 4 e 6%. Assim como o percentual de vazios, os valores fixados pela norma variam de acordo com a aplicação a que se destina a mistura de concreto asfáltico. Para camada de rolamento, a relação betume/vazios deve estar entre 75 e 82%. Para camada de ligação, o intervalo vai de 65 a 72%. O controle da porcentagem de vazios nas misturas asfálticas se faz necessário para prevenir a exsudação do ligante.



DOI: 10.29327/1430212.49-38

ANÁLISE DE CONCRETO ASFÁLTICO ESTOCÁVEL
PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

A Especificação DNIT ES 031:2006, no entanto, sugere que a estabilidade aceitável para pavimentos flexíveis feitos de concreto asfáltico seja de no mínimo 500kgf. Nesse contexto a mistura ensaiada apresentou estabilidade de 332,84 kgf indicando baixa capacidade de suporte de carga.

Na Tabela 6 são exibidos os resultados referentes à resistência à tração média, para os dez corpos de prova sem cura e com cura de 90 dias ao ar livre, sem aplicação de carregamento.

Tabela 6. Resultados dos ensaios de resistência à tração média por compressão diametral dos corpos de prova sem cura e com cura ao ar livre de 90 dias. (MOIZINHO, 2024).

Ensaio	Número de amostras	Diâmetro Médio (mm)	Altura Média (mm)	Força (N)	Resistência à Tração (MPa)
Resistência a Tração por compressão diametral (Sem cura)	10	102,2	68,9	790,0	0,07
Resistência a Tração por compressão diametral (90 dias de cura)	10	102,5	68,5	847,0	0,08

Como mostra a Tabela 6, os resultados de resistência à tração dos dez corpos de provas, obtidos nas situações de cura descritas são muito inferiores ao mínimo estabelecido por norma para um concreto asfáltico. A resistência à tração por compressão diametral de melhor resultado entre os grupos estudados (0,08 MPa), por exemplo, representa apenas 12,3% do valor exigido em especificações (0,65 MPa), deixando claro que a mistura pesquisada está muito aquém de um concreto asfáltico convencional neste quesito, segundo a metodologia de ensaio adotada nesta pesquisa.

O resultado aponta preocupação do uso da mistura, uma vez que, praticamente não houve alteração no valor da resistência à tração com a cura, além do mais o fornecedor recomenda a aplicação à frio com tráfego liberado no mesmo dia.

Santana e Lourenço (2017) obteve um valor de 0,074 MPa para resistência à tração sem cura de misturas CAE. Araujo et.al (2021) obtiveram um valor de 0,38 MPa de média para o caso com 90 dias de cura. Oliveira (2017) para mistura CAE, verificou resistência à tração variando de 0,02 a 0,06, respectivamente para zero (0) e sete (7) dias de cura. Os dados da presente pesquisa mostram-se semelhantes ao obtidos na literatura.

A resistência à tração de uma mistura asfáltica é importante, pois o revestimento deve ser capaz de resistir às tensões de tração geradas pelo tráfego nas fibras inferiores da camada asfáltica, portanto, é fundamental que as misturas tenham resistência à tração suficiente para prevenir à fadiga prematura do pavimento.

No contexto geral, o tipo de retardador de pega empregado parece ser o agente limitador de ganho ou não de resistências das misturas CAE. As empresas fornecedoras indicam a validade para maioria dos CAE, para aplicação a frio, de doze meses, mas não esclarece o período de cura após aplicação, isto pode, a princípio, ser um limitador de sua aplicação prática, e dessa forma o produto carece ser pesquisado com maior rigor.



CONCLUSÃO

Com relação ao material estocado, verificou-se que este encontrava-se semi-endurecido, tendo que ser desagregado com espátula para moldagem dos corpos de provas. Tal fato contrariou as expectativas acerca de um material estocável, mesmo estando dentro do prazo de validade indicado pelo fabricante.

A mistura CAE pesquisada apresentou granulometria próxima a faixa C, com diâmetro máximo de 4,75mm e teor de ligante em torno de 5,5%.

Os resultados de estabilidade Marshall não atende aos parâmetros estabelecidos pela norma DNIT ES 031:2006: Pavimentação: Concreto Asfáltico, sendo 33,5% inferior aos esperados para um concreto asfáltico convencional.

Com relação a resistência à tração por compressão diametral, não foi atendido o valor mínimo de 0,65 MPa, recomendado pela DNIT ES 031:2006, apresentando a mistura pesquisada resistência à tração média de 0,07 MPa e 0,08 MPa, respectivamente, para 0 (zero) e 90 (noventa) dias de cura ao ar livre, o que representa apenas 12,3 % do valor mínimo de referência.

O Concreto Asfáltico Estocável estudado não apresentou requisitos mínimos exigidos para um concreto asfáltico e, portanto, a necessidade de se estudar com mais rigor as misturas do tipo CAE, pois esta não se comporta como um concreto asfáltico convencional, de acordo com a metodologia Marshall, como prometem os fabricantes.

A pouca influência do tempo de cura nos resultados obtidos para resistência à tração diametral, sugere uma inadequação na dosagem do aditivo retardador de pega e questionamentos se o aditivo deixará de agir após a compactação.

O Concreto Asfáltico Estocável estudado não apresentou requisitos mínimos, mesmo para serviços de tapa buraco, devido sua baixa capacidade de suporte, resistência à tração muito baixa e incerteza do tempo de pega do material.

O comportamento em campo seria importante para avaliação do desempenho deste tipo de material e posterior sugestão de uso de forma racional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio das seguintes instituições: Universidade Federal de Roraima, Universidade de Brasília e a CAPES.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ARAÚJO, A. G.; ALMEIDA, M. S. S.; COSTA, W. G. S.; FIUZA, J. F. F.; GUIMARÃES, C. C. Caracterização de mistura asfáltica ensacada para utilização em rodovias federais. Revista pavimentação, v. 1, n. 50, p. 19–32, 2021. Disponível em: <<https://revistapavimentacao.org.br/wp-content/uploads/2021/04/Artigo-2-vf.pdf>>. Acesso em: 30 abril 2024.

BARROSO, L. X. Avaliação da dosagem e comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos em Goiás. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás - UFG, Goiânia, 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de rodovias 2023 – Brasília: CNT: SEST SENAT: ITL, 2023. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/pesquisas>>. Acesso em: 30 abril 2024.

CARVALHO, I. S.; REZENDE, L. R. D.; SILVA, J. P. S.; REZENDE, D. A. T. Estudo do Concreto Asfáltico Estocável. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 4, p. e-12881, 2020. Disponível em:



DOI: [10.29327/1430212.49-38](https://doi.org/10.29327/1430212.49-38)

**ANÁLISE DE CONCRETO ASFÁLTICO ESTOCÁVEL
PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762020000400339&tlng=pt>. Acesso em: 30 abril 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 031/2006 – ES. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ, 2006. Disponível em: < https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit031_2006_es.pdf> Acesso em: 30 abril 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 053/94: Misturas betuminosas – Percentagem de betume – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

HUANG, C.; YANG, T.; LIN, G.. The Evaluation of Short- and Long-Term Performance of Cold-Mix Asphalt Patching Materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2020, p. 1–11, 2020. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/amse/2020/8968951/>>. Acesso em: 30 abril 2024.

NOVO JUNIOR, C. G.; AZEVEDO, S. L. S. L.; AZEVEDO, B. F.; MARZANO JÚNIOR, M. A. P. Análise da viabilidade técnica do asfalto-borracha pré-misturado a frio nas obras de pavimentação. *Epitaya E-books*, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 29-50, 2021. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/74>. Acesso em: 1 maio. 2024.

PRUDENTE, C. Q. A. Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas a Quente Utilizadas em Goiás. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás - UFG, Goiânia, 2015.

OREŠKOVIC, M.; MENEGUSSO PIRES, G.; BRESSI, S.; VASCONCELOS, K.; LO PRESTI, D. Quantitative assessment of the parameters linked to the blending between reclaimed asphalt binder and recycling agent: A literature review. *Construction and Building Materials*, v. 234, p. 117323, 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819327758>>. Acesso em: 30 abril 2024.

POLACCO, G.; FILIPPI, S.; MERUSI F.; STASTNA G. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 224, p. 72–112, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001868615001165>>. Acesso em: 30 abril 2024.

REZENDE, D. A. T., SILVA, J. P. S., CARVALHO, I. S., REZENDE, L. R., 2019. Caracterização amostral de concreto asfáltico estocável por meio de ensaios laboratoriais. *Anais do 330 Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*, vol. 1, pp. 1438-1449, Balneário Camboriú, SC, 2019. Disponível em: <https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Ligantes%20e%20Misturas%20Asf%C3%A1lticas%20I/2_26_AC.pdf>. Acesso em: 30 abril 2024.

SANTANA, A. C. S. T.; LOURENÇO, V. M. Q. Análise das propriedades físicas e mecânicas de mistura asfáltica usinada à quente ensacada para aplicação à frio. *Anais do XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte, ANPET, Recife – PE*, v. 1, p. 1438-1449, 2017.

SENÇO, WLASTERMILER DE. Manual de técnicas de pavimentação: volume 1 / Wlastermiler de Senço . – 2. ed. ampl . — São Paulo: Pini, 2007.



ADEQUAÇÕES À PRÁTICA LOCAL DO DAER/RS NAS COMPOSIÇÕES DE CONCRETO ASFÁLTICO DA METODOLOGIA SICRO.

Mara Regina Bianchini¹; Bibiana Cardoso Fogaça¹.

RESUMO

A partir de 2021 o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER/RS) adotou a metodologia do sistema de custos referenciais de obras (SICRO) para a elaboração do orçamento referencial de obras em rodovias, a serem contratadas. O concreto asfáltico (CA) é o material/serviço mais utilizado nas camadas de revestimento da malha rodoviária estadual. Sendo assim, foi identificada a necessidade de ajustar algumas composições de preço unitárias (CPUs) para o adequado emprego da metodologia SICRO. A principal adequação realizada foi referente ao serviço de usinagem do concreto asfáltico, uma vez que, a composição considerada deve representar a realidade das obras e as práticas locais. O objetivo deste trabalho foi apresentar uma composição de usinagem, nos moldes do SICRO, mais adequada à realidade das obras do DAER/RS. A direção do DAER/RS solicitou às fiscalizações das obras e aos técnicos que atuam através do Contrato de Apoio Técnico (CAT) o fornecimento dos projetos de dosagem das misturas asfálticas das obras em andamento e de obras recentes realizadas pelo DAER/RS. A Superintendência de Pesquisas Rodoviárias (SPQ) do DAER/RS procedeu ensaios e análises visando subsidiar tecnicamente as alterações necessárias. Verificou-se que a composição da usinagem do concreto asfáltico (6416078) no SICRO previa a utilização de areia, materiais pétreos e cal hidratada em proporções significativamente diferentes daquelas utilizadas nas obras do DAER/RS. Após a análise de 28 projetos executivos de dosagem de misturas asfálticas foi possível adequar os materiais e suas respectivas porcentagens para a composição de usinagem nos moldes do SICRO.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto asfáltico; Metodologia SICRO; dosagem; granulometria.

ABSTRACT

From 2021 Rio Grande do Sul's State Road Department (DAER/RS) has adopted the Referential Cost System for Works (SICRO) methodology for the elaboration of the reference budget for contracted road works. Asphalt concrete (CA) is the most used material/service in the pavement layers of the state's highways network. Therefore, a need was identified to adjust some unit price compositions (CPUs) for the proper application of the SICRO methodology. The main adjustment made was regarding the asphalt mix production, as the composition considered should reflect the local reality of the works and practices. The objective of this work was to present a composition of asphalt mix production, in the SICRO model, more suitable to the reality of DAER's works. DAER's senior management requested its technicians and road building works supervisors developing its activities under the Technical Support Contract (CAT) to provide the asphalt mixture design from ongoing works and recent works carried out by DAER-RS. The Road Research Superintendence (SPQ) of DAER-RS conducted tests and analyses aiming at technically validate the necessary changes. It was found that the composition of asphalt mix production (6416078) in SICRO predicted the use of sand, aggregate materials, and hydrated lime in significantly different proportions from those used in DAER's works. After analysing 28 executive asphalt mixture design it was possible to adjust the materials and their respective percentages for the composition of asphalt mix production in accordance with SICRO.

KEY WORDS: Hot mix asphalt; Asphalt mixture design; SICRO methodology; milling composition

¹ Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem – DAER/RS, e-mail: marab@daer.rs.gov.br; bibiana@daer.rs.gov.br.



DOI: [10.29327/1430212.49-43](https://doi.org/10.29327/1430212.49-43)

ADEQUAÇÕES À PRÁTICA LOCAL DO DAER/RS NAS
COMPOSIÇÕES DE CONCRETO ASFÁLTICO DA METODOLOGIA SICRO

INTRODUÇÃO

O Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem – DAER/RS é a autarquia responsável pela administração de mais de 10.000 km de rodovias no estado do Rio Grande do Sul. A malha rodoviária estadual pavimentada é superior a 7.000 km. (DAER, 2024)

Até o ano de 2020 o DAER/RS utilizava sistemas próprios na elaboração de orçamento referencial para as obras a serem contratadas, no entanto, a partir de 2021, através da publicação da IS 120/21 (DAER, 2021), o DAER/RS passou a utilizar a metodologia do sistema de custos referenciais de obras (SICRO) elaborada pelo DNIT. (DNIT, 2024)

Quando da implementação da metodologia SICRO, verificou-se que algumas composições de preço unitários (CPUs) utilizadas no âmbito do DNIT necessitavam ser adequadas visando retratar adequadamente as práticas locais e a realidade das obras no âmbito do DAER/RS.

O concreto asfáltico (CA) ou concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é o material/serviço mais utilizado nas camadas de revestimento nas rodovias da malha rodoviária estadual pavimentada sob jurisdição do DAER/RS. Identificou-se que a principal necessidade de adequação da composição de preço unitário (CPU), apresentada na metodologia SICRO era referente ao serviço de usinagem do concreto asfáltico com aquisição de brita comercial. Na metodologia SICRO esta CPU é identificada como: usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais (6416078).

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma composição de usinagem adaptada, seguindo a padronização praticada na metodologia do SICRO, mais adequada à realidade das obras do DAER.

O escopo do presente trabalho está subdividido em três partes: a análise da composição da usinagem do concreto asfáltico, conforme SICRO (6416078); a análise da composição média da massa asfáltica utilizada nas obras recentes e em andamentos no âmbito do DAER e a confrontação entre os dados obtidos nas dosagens com as composições da metodologia SICRO quanto aos materiais e respectivos percentuais de utilização.

Análise da composição da usinagem do concreto asfáltico, conforme metodologia SICRO

Na metodologia SICRO, (DNIT, 2024), identificou-se a Composição de Preço Unitária referente ao serviço: 6416078 Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais e avaliou-se quais os materiais compõe o referido serviço.

Na Figura 1 está apresentada a composição apresentada na metodologia SICRO.

Verifica-se que os materiais que fazem parte da composição de preço unitário da usinagem do concreto asfáltico na metodologia SICRO são: Areia média (M0028), Pedrisco (M1103), Brita 0 (M0005) e Brita 1 (M0191), além da Cal hidratada (M0344) e do CAP 50/70 (M1943).

Analisando esta CPU verificou-se que a quantidade de cada um dos materiais considerados para compor a mistura de concreto asfáltico é apresentada em volume (m^3). Os projetos de dosagem de uma mistura asfáltica consideram os percentuais de cada um dos materiais de sua composição, em peso. Sendo assim, foi necessário realizar a conversão das quantidades dos materiais considerados em volume para o equivalente em peso, considerando-se a densidade referencial de $1,5\text{ton}/m^3$ prevista no SICRO. Os percentuais destes materiais também foram apreciados.



CGCIT

DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO

Rio Grande do Sul

Produção da equipe

99,60 t

Custo Unitário de Referência

Janeiro/2024

6416078 Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais

Valores em reais (R\$)

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9559 Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	1,00000	1,00	0,00	69,7432	40,2051	69,7432
E9684 Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kW	1,00000	0,80	0,20	186,3401	91,9476	167,4616
E9021 Grupo gerador - 456 kVA	1,00000	1,00	0,00	303,2627	22,5328	303,2627
E9558 Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	2,00000	1,00	0,00	54,8464	37,3275	109,2928
E9609 Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 200 kW	1,00000	1,00	0,00	1.230,0156	650,5085	1.230,0156
				Custo horário total de equipamentos		1.900,5759
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade		Custo Horário		Custo Horário Total
P9024 Servente	4,00000	h		21,3907		85,5628
				Custo horário total de mão de obra		85,5628
				Custo horário total de execução		2.046,1387
				Custo unitário de execução		20,5436
				Custo do FIC		-
				Custo do FIT		-
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade		Preço Unitário		Custo Unitário
M0028 Areia média	0,32478	m³		127,8376		41,5162
M0005 Brita 0	0,06045	m³		130,8126		8,1092
M0191 Brita 1	0,06245	m³		128,5792		8,0298
M0344 Cal hidratada - a granel	56,20000	kg		0,3733		20,9795
M1943 Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	0,06323	t		0,0000		0,0000
M1941 Óleo tipo A1	0,00000	l		5,4726		43,7000
M1103 Pedricos	0,13739	m²		130,1029		17,8748
				Custo unitário total de material		140,3493
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade		Custo Unitário		Custo Unitário
				Custo total de atividades auxiliares		
				Subtotal		160,8929
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade		Custo Unitário	Custo Unitário
M0028 Areia média - Caminhão basculante 10 m³	5014647	0,48713	t		1,6500	0,8038
M0005 Brita 0 - Caminhão basculante 10 m³	5014647	0,09368	t		1,6500	0,1546
M0191 Brita 1 - Caminhão basculante 10 m³	5014647	0,09368	t		1,6500	0,1546
M0344 Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5014363	0,06620	t		16,7900	0,0430
M1103 Pedricos - Caminhão basculante 10 m²	5014647	0,20009	t		1,6500	0,3400
				Custo unitário total de tempo fixo		2,3960
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário
			LN	RP	P	
M0028 Areia média - Caminhão basculante 10 m³	0,48713	tkm	5014359	5014374	5014389	
M0005 Brita 0 - Caminhão basculante 10 m³	0,09368	tkm	5014359	5014374	5014389	
M0191 Brita 1 - Caminhão basculante 10 m³	0,09368	tkm	5014359	5014374	5014389	
M0344 Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	0,06620	tkm	5014364	5014366	5014366	
M1103 Pedricos - Caminhão basculante 10 m²	0,20009	tkm	5014359	5014374	5014389	
			Custo unitário total de transporte			
			Custo unitário direto total			163,29

Figura 1: Composição de Preço Unitária referente ao serviço: 6416078 Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais, conforme DNIT, 2024.

Foram selecionados os materiais apresentados e considerados nesta CPU para confecção de tabela onde o principal objetivo foi a obtenção da composição granulométrica correspondente. Assim, na Tabela 1 estão apresentados os materiais, as quantidades e suas respectivas unidades conforme previstos no serviço DNIT (6416078 Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais), bem como suas respectivas quantidades, unidades e percentuais de utilização, com e sem CAP, tanto em volume, quanto em peso.

Quanto à composição granulométrica, sem CAP, verifica-se que na composição da usinagem do concreto asfáltico (6416078) há a previsão de utilização de areia média na proporção de 52%. No âmbito das obras no estado do Rio Grande do Sul, verificou-se que, desde o início da utilização da metodologia SICRO pelo DAER/RS esta descrição de "Areia média" foi equivocadamente entendida como areia de origem fluvial e, na maioria das vezes foi assim precificada nos orçamentos referenciais.



DOI: 10.29327/1430212.49-43

ADEQUAÇÕES À PRÁTICA LOCAL DO DAER/RS NAS
COMPOSIÇÕES DE CONCRETO ASFÁLTICO DA METODOLOGIA SICRO

Verifica-se ainda que o Pedrisco tem previsão de utilização na proporção de 22%, a Brita 0 e a Brita 1 na proporção de 10% e a cal hidratada na proporção de 6%, considerando-se a composição na granulometria seca, sem CAP.

DNIT (6416078) Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais)				Conversão para ton, considerando a densidade referencial de 1,5 ton/m ³ prevista no SICRO			
Material	Unidade	Quantidade		Unidade	Quantidade	% (c/ CAP)	% (s/ CAP)
M0028	Areia média	m ³	0,32475	t	0,487125	48,70%	52,0%
M0005	Brita 0	m ³	0,06245	t	0,093675	9,40%	10,0%
M0191	Brita 1	m ³	0,06245	t	0,093675	9,40%	10,0%
M0344	Cal hidratada	ton	0,0562	t	0,0562	5,62%	6,0%
M1943	CAP 50/70	ton	0,06323	t	0,06323	6,32%	
M1941	Óleo tipo A1	l	8,00000				
M1103	Pedrisco	m ³	0,13739	t	0,206085	20,60%	22,0%

Tabela 1: Quantidades para CPU da usinagem do concreto asfáltico (6416078) fornecidas pelo SICRO em volume e convertidas para percentuais em peso.

Análise da composição média do concreto asfáltico utilizado nas obras no âmbito do DAER/RS

Conforme referido anteriormente, foram recebidos e analisados 28 projetos executivos de mistura de concreto asfáltico. Destes, 24 representavam projetos completos e com faixa granulométrica compatível com a análise em questão. Com isso foi possível realizar a verificação de quais materiais pétreos estavam sendo utilizados nas dosagens, bem como os respectivos percentuais de utilização.

Assim, verificou-se que quanto à utilização de areia média (de origem fluvial) somente 4 dosagens utilizaram tal material. Ainda, a areia, quando empregada, foi utilizada com percentual médio de 5%, o que é compatível com boas técnicas de dosagens. Assim, considerando-se o exposto, decidiu-se por não contemplar a areia de origem fluvial como material representativo e comumente utilizado nas misturas asfálticas no âmbito do DAER.

Quanto à utilização da cal hidratada, verifica-se que na composição da usinagem referencial do SICRO há a previsão de utilização de 6% de cal hidratada (na composição na granulometria seca).

Verificou-se que, dos 24 projetos de dosagem analisados, a cal estava presente em apenas 1 projeto de dosagem e em percentual de 2%. Assim, considerando-se o exposto, decidiu-se por não contemplar a cal hidratada como material representativo e comumente utilizado nas misturas asfálticas no âmbito das obras do DAER.

Por fim, verificou-se que 17 projetos de dosagem utilizaram 3 materiais pétreos para a composição da granulometria e 7 projetos de dosagem utilizaram 4 materiais pétreos para a composição da granulometria. Assim, visando a representação mais frequente da prática local, decidiu-se por contemplar a utilização de 3 materiais pétreos na composição referencial adequada à prática local.

Na Tabela 2 apresenta-se o resumo dos projetos de dosagens de concreto asfáltico utilizados, bem como a apresentação dos parâmetros supra referidos.



Ordem	Faixa	3/4" ou Brita 1 (%)	3/8" ou Brita 0 (%)	Pó de Pedra	Pó de Pedra fino	Total de Pó de pedra	Silos	Outro (qual)	%	Filler	%	Teor Ligante (%)	DENSIDADE (100%) (g/cm³)
CA01	B DAER	18	20	36	26	62	4		0		0	5,1	2,532
CA02	B DAER	15	15	70	0	70	3		0		0	5	2,571
CA03	C DNIT	20	28	52	0	52	3		0		0	5,1	2,533
CA04	B DAER	21	27	52	0	52	3		0		0	5,8	2,225
CA05	B DAER	17	30	53	0	53	3		0		0	5,7	2,233
CA06	B DAER	21	21	58	0	58	3		0		0	5,8	2,194
CA07	C DNIT	21	23	56	0	56	3		0		0	5,4	2,34
CA08	B DAER	20	60	20	0	20	3		0		0	5	2,514
CA09	B DAER	20	19	59	0	59	3		0	Cal hidrat.	2	5,1	2,327
CA11	C DNIT	18	28	0	54	54	3		0		0	4,6	2,578
CA12	C DNIT	18	28	54	0	54	3		0		0	5,6	2,23
CA13	C DNIT	19	25	55	0	55	3		0	Não inf.	1	5,5	2,225
CA15	B DAER	18	20	36	26	62	4		0		0	5,1	2,532
CA16	B DAER	20	23	50	7	57	4		0		0	5,4	2,576
CA17	B DAER	18	22	60	0	60	3		0		0	5,4	2,565
CA19	B DAER	15	22	54	0	54	4	Areia	9		0	5,1	2,454
CA20	B DAER	15	25	60	0	60	3		0		0	5,3	2,434
CA21	B DAER	15	26	59	0	59	3		0		0	5,1	2,435
CA22	B DAER	13	27	60	0	60	3		0		0	5	2,515
CA23	B DAER	16	28	56	0	56	3		0		0	5,8	2,24
CA24	B DAER	13	30	52	0	52	4	Areia	5		0	5,6	2,35
CA25	B DAER	17	23	55	0	55	4	Areia	5		0	5,3	2,3
CA26	B DAER	20	24	51	0	51	4	Areia	5		0	5,3	2,516
CA28	B DAER	15	20	65	0	65	3		0		0	5,5	2,298
Média		18	26			56							

Tabela 2: Resumo dos projetos analisados.

Quanto ao percentual de CAP utilizado, apesar de se ter obtido o percentual médio de utilização a partir da análise dos mesmos projetos de dosagens referidos anteriormente, optou-se por não fazer tal alteração, visto que a precificação deste material nos orçamentos referenciais tem por objetivo prever o valor para indenização por regras específicas, conforme o real percentual de utilização em cada obra.



DOI: 10.29327/1430212.49-43

ADEQUAÇÕES À PRÁTICA LOCAL DO DAER/RS NAS
COMPOSIÇÕES DE CONCRETO ASFÁLTICO DA METODOLOGIA SICRO**Adequações entre a composição do concreto asfáltico conforme metodologia SICRO com a composição média identificada nas obras no âmbito do DAER/RS**

Conforme referido anteriormente, identificou-se então os três materiais pétreos comumente utilizados nas obras contratadas pelo DAER, cujos projetos estão em andamento ou foram utilizados em obras recentes. Identificou-se como representativos: Pó de pedra (M1135), Brita 0 (M0005) e Brita 1 (M0191). Os percentuais de utilização obtidos anteriormente a partir da análise dos projetos de dosagem foram utilizados na adequação da composição. Para tanto realizou-se a conversão das quantidades em peso, para o equivalente em volume, considerando-se a densidade referencial de 1,5 ton/m³ prevista no SICRO, já utilizada anteriormente.

Na Tabela 3 estão apresentados os materiais identificados como representativos na adequação DAER ao serviço: 6416078 Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais, bem como seus respectivos percentuais de utilização, tanto em volume, quanto em peso. Assim, as quantidades em volume, conforme previsto na metodologia SICRO foram utilizadas na elaboração da composição de preço unitária adequada à realidade do DAER.

Adequação CPU DAER (Usinagem de concreto asfáltico - brita comercial) Conversão para m ³ – referência SICRO: 1,5 ton/m ³				Composição média, obras âmbito DAER: Sem areia, sem Cal, 3 materiais pétreos % de CAP: não alterado			
	Material	Unidade	Quantidade	Unidade	Quantidade	% (c/ CAP)	% (s/ CAP)
M1135	Pó de pedra	m ³	0,34973	ton	0,524591	52,5%	56,0%
M0005	Brita 0	m ³	0,11241	ton	0,168619	16,9%	18,0%
M0191	Brita 1	m ³	0,16237	ton	0,243560	24,4%	26,0%
M0344	Cal hidratada	ton	-	ton	-	0%	0%
M1943	CAP 50/70	ton	0,06323	ton	0,06323	6,32%	-
M1941	Óleo tipo A1	l	8,00000				
M1103	Pedrisco	m ³	-	ton	-	0%	0%

Tabela 3: Composição de Usinagem de concreto asfáltico adequada às obras no âmbito do DAER/RS.

Na adequação verifica-se então o que foi referido anteriormente, ou seja, a adequação da nomenclatura dos materiais finos necessários para uma adequada mistura de concreto asfáltico usualmente denominada “pó de pedra” e a supressão da “areia média”, conforme já abordado anteriormente. Também foi suprimida a utilização da cal hidratada.

Desta forma, na adequação tem-se a presença de 3 materiais pétreos: o Pó de pedra e as Brita 0 e Brita 1, já utilizadas anteriormente no referencial do SICRO, mas cujos percentuais de utilização foram adequados à prática local.



RESULTADOS E ANÁLISES

Após a análise da composição da usinagem do concreto asfáltico, conforme apresentada na metodologia SICRO e a análise da composição média do concreto asfáltico utilizada nas obras recentes e em andamentos no âmbito do DAER, foi possível propor uma CPU adequada à realidade do DAER/RS, retratando os reais materiais e seus respectivos percentuais de utilização.

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma composição de usinagem adaptada, seguindo a padronização praticada na metodologia do SICRO, mais adequada à realidade das obras do DAER. Assim, as principais alterações consistem na adequação da nomenclatura dos materiais finos necessários para uma adequada mistura de concreto asfáltico usualmente denominada “pó de pedra” e a supressão da “areia média”, conforme já abordado anteriormente. Também foi suprimida a utilização da cal hidratada como material representativo e comumente utilizado nas misturas asfálticas no âmbito das obras do DAER. Por fim, a adequação prevê a utilização de 3 materiais pétreos na composição referencial em percentuais adequados à prática local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DAER/RS). IS-120 / 21 INSTRUÇÃO DE SERVIÇO PARA ELABORAÇÃO DE ORÇAMENTO DE OBRAS RODOVIÁRIAS CONFORME A METODOLOGIA DO SICRO – DNIT. Disponível em 27144121-2023-02-daer-instrucoes-servico-projeto-rev02.pdf. Publicado em fev 2023. Acesso em: 30 abr. 2024.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DAER/RS). Composição da Malha Rodoviária. Disponível em: <<https://www.daer.rs.gov.br/composicao-da-malha>>. Acesso em: 30 abr. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Relatório Analítico de Composição de Custos. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/sul/parana/2024/janeiro/janeiro-2024>. Acesso em: 30 abr. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). MANUAL DE CUSTOS RODOVIÁRIOS. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/sicro2/manual-de-custos-rodoviaros>>. Acesso em: 30 abr. 2024.



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO DE ASFALTO DE ALTO MÓDULO MODIFICADO COM POLÍMERO À BASE DE POLIETILENO E SUA INFLUÊNCIA EM MISTURA ASFÁLTICA MORNA

Andressa Zampieri Rosa¹; Gustavo Oliveira Couto²; Jesner Sereni Ildefonso³; Thayná Yamamoto Fávero⁴; Gabriela do Prado Ferreira⁵; Fabricio de França Fernandes⁶ e Luiz Henrique de Assis Fagundes⁷

RESUMO

O tráfego elevado e intenso gera a demanda por melhores técnicas construtivas e materiais mais resistentes e duráveis, de modo a se ter rodovias com maior vida em serviço. Em se tratando dos materiais, a necessidade por asfaltos que atendam essas características, associada ao desenvolvimento sustentável, instiga pesquisas que investiguem asfaltos de alto módulo e com seu uso dado em temperaturas reduzidas. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi determinar a possibilidade de produzir mistura asfáltica de alto módulo a temperaturas inferiores às convencionais, sem que o seu desempenho reológico e mecânico fosse comprometido. Para tanto, utilizou-se um aditivo de alto módulo no ligante e foi realizada dosagem de projeto para uma mistura morna. Investigou-se o comportamento reológico do ligante por meio da Classificação PG, o ensaio de fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR) e a avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS). Também foi analisada a resistência da mistura à deformação permanente por meio do ensaio de Roda de Hamburgo e determinação do módulo de resiliência. Os resultados obtidos revelam que a massa asfáltica apresentou maior resistência à deformação permanente e o ligante demonstrou resultados reológicos satisfatórios, um conjunto que possibilitou uma mistura de alto módulo com desempenho elevado e menor consumo energético devido a usinagem e compactação em temperaturas reduzidas.

PALAVRAS-CHAVE: Performance Grade; Módulo de Resiliência; Roda de Hamburgo; Método Bailey.

ABSTRACT

High and intense traffic generates demand for better construction techniques and more resistant and resistant materials, in order to have highways with a longer service life. When it comes to materials, the need for asphalt that meets these characteristics, associated with sustainable development, encourages research that investigates high modulus asphalt and its use in reduced temperatures. In this context, the objective of this study was to determine the possibility of producing a high modulus asphalt mixture at temperatures lower than conventional ones, without compromising its rheological and mechanical performance. Therefore, a high modulus additive was used in the binder and a design dosage was carried out for a warm mixture. The rheological behavior of the binder is investigated using the PG Classification, Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) and Linear Amplitude Sweep (LAS). The mixture's resistance to permanent deformation was also proven through the Test Double Wheel Tracker and determination of the resilient modulus. The results obtained reveal that the asphalt mixture showed greater resistance to permanent deformation, and the binder demonstrated satisfactory rheological results, a combination that enabled a high modulus mixture with high performance and lower energy consumption due to machining and compaction at reduced temperatures.

KEY WORDS: Performance Grade; Resilient Modulus; Hamburg Wheel Tracker; Method Bailey.

¹ Universidade Estadual de Maringá (UEM), andressazrosa@hotmail.com; jsildefonso@uem.br; luizfagundes5@gmail.com;

² Centro Tecnológico CBAA Asfaltos, ctec-sp@cbaa-asfaltos.com.br; fabricio.fernandes@cbaa-asfaltos.com.br; thayna.favero@cbaa-asfaltos.com.br; gabidopradofc@gmail.com.



Andressa Zampieri Rosa,
Gustavo Oliveira Couto, Jesner Sereni Ildefonso,
Thayná Yamamoto Fávero, Gabriela do Prado Ferreira,
Fabrício de França Fernandes e Luiz Henrique de Assis Fagundes

INTRODUÇÃO

Os pavimentos asfálticos são suscetíveis ao desgaste ao longo do tempo, bem como às deformações permanentes e às trincas por fadiga. Diante das demandas por transporte, esse fato tem ocorrido com maior intensidade, haja vista o crescimento da quantidade de veículos trafegando nas rodovias e também devido às cargas mais pesadas por eixo. De acordo com estudo realizado pelo IBGE (2023), o número de caminhões cresceu 9,2% no período de 2016 a 2022, o que exige melhor resposta do revestimento asfáltico, por se tratarem de veículos pesados.

Para que o pavimento suporte às solicitações do tráfego, os materiais constituintes devem possuir boas características e serem resistentes. Dentre as alternativas de seleção de materiais para a construção de um revestimento que seja capaz de resistir a climas mais quentes e tráfego mais intenso está o asfalto de alto módulo. Sua formulação pode ser alcançada por métodos empíricos ou por propriedades baseadas em desempenho (HARITONOV *et al.*, 2013) e sua principal característica é a maior viscosidade e resistência à deformação permanente (CAPITÃO; PICADO-SANTOS, 2006). Geralmente existem três formas de se obter um ligante com essas características: (1) a partir de asfaltos mais duros, com baixa penetração e alto ponto de amolecimento (MA; FU, 2008); (2) utilizando polímeros como modificador (ZHANG, 2017), (3) inserindo agente de alto módulo (MA *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2018).

Brosseaud (2006) assinala que ao utilizar ligantes com maior consistência, obtêm-se pavimentos com características mecânicas superiores, conferindo elevado módulo de deformabilidade à mistura asfáltica (VILLELA, 2012). Xiao *et al.* (2019) adicionaram dois tipos de agentes de alto módulo ao asfalto virgem e ao asfalto modificado com SBS e estudaram o desempenho do ligante modificado e da mistura asfáltica. Eles relataram que o desempenho do asfalto e da mistura asfáltica em alta temperatura melhorou após a adição de um agente de alto módulo, mas seu desempenho em baixa temperatura diminuiu ligeiramente. Usando testes de varredura de frequência, Geng *et al.* (2013) e Wang *et al.* (2017) relataram que o ligante asfáltico de alto módulo tem maior módulo complexo e menor ângulo de fase do que o asfalto convencional. Também apresentaram menor recuperação elástica do que o modificado por SBS. Usando testes de varredura de temperatura, descobriu-se que os ligantes de alto módulo têm deformação permanente $G^*/\sin\delta$ mais alto do que o asfalto base (LIANG, 2016).

Ao passo em que se tem uma demanda por pavimentos mais resistentes, gerado pelo aumento de veículos, este fato ocasiona preocupações relacionadas ao meio ambiente, devido à emissão de carbono geradas tanto pelos veículos, quanto pela produção de asfaltos. Nas últimas décadas, esforços em pesquisas no setor de materiais rodoviários têm sido feitos por estudiosos e pela indústria para desenvolver alternativas sustentáveis e econômicas à produção tradicional e consolidada de concretos asfálticos. Neste sentido, uma possibilidade potencialmente mais barata e mais sustentável é asfalto morno (*Warm Mix Asphalt* - WMA) (ALMEIDA-COSTA; BENTA, 2016), que é produzido em temperaturas mais baixas em relação ao tradicional a quente.

A redução da temperatura leva a uma diminuição de gases de combustão, partículas de poeira, carbono orgânico total, compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (RUBIO *et al.*, 2012). Hamzah *et al.* (2010) produziram uma mistura a quente cerca de 15 °C inferior à mistura convencional, adicionando 4% de um aditivo orgânico. Através desta modificação, houve diminuição de 12% na energia de aquecimento e nas emissões de CO₂. Misturas mornas podem ser produzidas em temperaturas 40 °C mais baixas que o normal, consumindo de 20% a 35% menos combustível durante o aquecimento dos componentes (BENTA *et al.*, 2015).

DOI: [10.29327/1430212.49-31](https://doi.org/10.29327/1430212.49-31)

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO DE ASFALTO DE ALTO MÓDULO
MODIFICADO COM POLÍMERO À BASE DE POLIETILENO E SUA INFLUÊNCIA EM MISTURA ASFÁLTICA MORNA

Portanto, este estudo teve por objetivo investigar o impacto do agente de alto módulo nas propriedades reológicas e mecânicas do ligante e sua influência no desempenho da mistura asfáltica morna. Para alcançar estes objetivos, o cimento asfáltico de petróleo (CAP) PRO W foi selecionado como asfalto base e para ser modificado com um agente de alto módulo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo utilizou agregados pétreos (rocha granítica) nas granulometrias de brita, pedrisco e pó de pedra, além do ligante modificado em laboratório. A investigação tem como base a norma AFENOR P98-140, mas para a caracterização dos ligantes foram utilizadas as normas apresentadas na Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) N° 897 de 18 de Novembro de 2022 e métodos de ensaios do DNIT na caracterização dos agregados.

Para os agregados, foram realizadas granulometria e ensaios físicos dos materiais provenientes da Pedreira Riuma localizada em São Paulo/SP. O ligante utilizado na investigação foi o CAP PRO W da refinaria REVAP disponibilizado pela distribuidora, sendo utilizado para formulação o aditivo HONEYWELL TITAN®, que é um polímero à base de polietileno, utilizado para melhorar o desempenho do ligante asfáltico estando ou não sob modificação de polímero.

Os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico da distribuidora CBAA (CTEC) e no laboratório do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT). A formulação foi realizada em laboratório, no misturador mecânico modelo FISATON 713D, com temperatura constante de 160 °C e 300 rpm até sua completa incorporação, que durou 1 hora. Inicialmente o ligante foi pré-aquecido até 160°C por 30 min, na sequência, foi adicionado o aditivo e não foi identificada nenhuma alteração significativa no volume ou na temperatura da amostra, que permaneceu por mais 30 min no misturador. Posteriormente foram realizados ensaios de especificação de material (penetração, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, viscosidade, ductilidade e variações pós RTFOT) conforme determinação de limites estabelecidos internamente na CBAA, devido à ausência de uma especificação para o produto no Brasil.

Agregados

Para análise física dos agregados, foram realizados os ensaios de caracterização conforme expressos na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos agregados

Ensaio	Norma	Unidade	Resultado
Equivalente de areia – Pó de brita	DNER ME 054	%	77,33
Desgaste Los Angeles	DNER ME 035	%	25
Índice de forma pelo paquímetro	ABNT NBR 7809	-	1,32
Sanidade	DNER ME 089	%	0,08
Densidade real – Pó de brita	DNIT 411	-	2,638
Densidade aparente – Pó de brita	DNIT 411	-	2,677
Densidade aparente – Brita 1/2	DNIT 413	-	2,532
Densidade real – Brita 1/2	DNIT 413	-	2,58
Densidade aparente – Pedrisco	DNIT 413	-	2,472
Densidade real – Pedrisco	DNIT 413	-	2,501



Andressa Zampieri Rosa,
Gustavo Oliveira Couto, Jesner Sereni Ildefonso,
Thayná Yamamoto Fávero, Gabriela do Prado Ferreira,
Fabrício de França Fernandes e Luiz Henrique de Assis Fagundes

Conforme apresentado na Tabela 1, o agregado em questão apresentou características específicas que o tornam adequado para o uso em pavimentação. Em relação à composição granulométrica adotada para a mistura de alto módulo, utilizou-se uma distribuição contínua por meio do método *Bailey* de condição graúda. Dessa forma, a mistura é composta por 35,04% de brita, 34,71% de pedrisco e 30,25% de pó de pedra.

Ligante

Para a caracterização do ligante asfáltico morno proveniente da refinaria, executou-se a análise amparada nos parâmetros apresentados na Resolução ANP N° 897, a qual apresenta os ensaios e especifica os limites a serem atendidos. Para o material modificado, os limites foram estabelecidos por normativa interna da própria distribuidora e os ensaios realizados foram os mesmos feitos com o ligante base. Na Tabela 2 estão destacados os ensaios juntamente com os resultados obtidos.

Tabela 2. Caracterização do ligante base e modificado com agente de alto módulo

Ensaio	Método	CAP PRO W		CAP Alto Módulo	
		Resultado	Limite	Resultado	Limite
Penetração a 25 °C, 100 g, 5 s, (0,1mm)	6576:2007	30	30-45	16	10 - 25
Ponto de Amolecimento, mín. (°C)	6560:2016	53,5	52	71,3	61
Ponto de Fulgor - Vaso Aberto Cleveland, mín. (°C)	11341:2014	314	235	310	235
Viscosidade Brookfield a 135 °C, spindle 21, 20 rpm, (cP)	15184:2004	537,5	374	597,5	500 - 2500
Viscosidade Brookfield a 150 °C, spindle 21, 50 rpm, máx. (cP)	15184:2004	239	203	291	300
Viscosidade Brookfield a 177 °C, spindle 21, 100 rpm, máx. (cP)	15184:2004	88	76-285	104,5	145
Ductilidade a 25 °C	6293:2015	100	60	100	10
Estabilidade à estocagem (°C)	6570:2016	2,05	-	-	-
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 minutos					
Varição de Massa, máx., (% massa)	15235:2009	0,5	-0,245	-0,3	0,5
Varição do Ponto de Amolecimento - P.A., máx., (°C)	6560:2016	8,0	6,7	3,6	8,0
Porcentagem de Penetração Orig, mín. (%)	6576:2007	60	60	61,9	55
Ductilidade a 25 °C	6293:2015	84,5	10	17,5	10

Com base nos valores recomendados nas normas, o material encontra-se com resultados dentro do exposto na resolução ANP 897 de novembro de 2022 para o CAP 30/45. Entretanto o CAP Alto Módulo 10-25 não possui uma especificação brasileira que limite o produto, desta forma, a especificação adotada foi de acordo com os controles de qualidade do produto desenvolvido e com referências de certificados já utilizados por outras distribuidoras do Brasil.

Ensaio reológico no ligante e análise mecânica da mistura

Dando sequência aos procedimentos, foram realizados ensaios reológicos no ligante modificado e no ligante base, seguido da dosagem da mistura e análise da massa asfáltica dosada com o CAP de alto módulo. As metodologias dos ensaios realizados estão apresentadas a seguir:



DOI: [10.29327/1430212.49-31](https://doi.org/10.29327/1430212.49-31)

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO DE ASFALTO DE ALTO MÓDULO
MODIFICADO COM POLÍMERO À BASE DE POLIETILENO E SUA INFLUÊNCIA EM MISTURA ASFÁLTICA MORNA

Classificação PG (*Performance Grade*)

O ensaio de Performance Grade foi feito conforme as normas AASHTO T 315 e ASTM D7643, em um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico com geometria de 25 mm. Conforme estabelecido pela norma, a temperatura do ensaio possui um acréscimo de 6 °C contínuos, sendo a temperatura inicial pré-determinada de 58 °C. Com esse ensaio encontra-se o valor de $G^*/\text{sen}\delta$, devendo ser o mais próximo de 1,00 kPa (para condição virgem), entretanto ao atingir um valor menor é apontada a “falha”, considerando-se, então, a temperatura anterior como PG. Esse ensaio foi realizado após o envelhecimento pela estufa RTFOT com base na norma ABNT NBR 15235 e a análise foi realizada considerando o valor de falha de 2,2 kPa (para condição envelhecido).

Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas – MSCR (*Multiple Stress Creep and Recovery*)

Com o resultado obtido na avaliação de PG foi realizado o ensaio MSCR na temperatura encontrada anteriormente, com geometria de 25 mm. Este método, regido pela Norma AASHTO M 332, determinou o percentual de recuperação e compliância não recuperável do ligante asfáltico através do ensaio de fluência e recuperação executado a tensões de 100 Pa e 3200 Pa. A mostra passou por ciclos de 1 s de tensão e fluência e 9 s de recuperação (tensão nula) e foram realizados 30 ciclos, sendo 20 com tensão de 100 Pa e 10 com tensão de 3200 Pa. Através dos valores de $J_{m,diff}$ a 3200 Pa, foi possível especificar o tipo de desempenho no qual a amostra terá em relação ao nível de tráfego: “S” (*Standard*), “H” (*Heavy*), “V” (*Very Heavy*) e “E” (*Extremely Heavy*).

Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear - LAS (*Linear Amplitude Sweep*)

O ensaio foi realizado com a amostra envelhecida e moldada na geometria de 8 mm, com temperatura constante de 19 °C, de acordo com a norma DNIT 439/2022 – ME. Através deste ensaio, realizado no *Dynamic Shaer Rheometer* (DSR), foi possível determinar a resistência à fadiga do material, por meio da aplicação de carregamentos cíclicos para cisalhamento com amplitudes linearmente crescentes. Com esse ensaio obteve-se os valores de módulo de fadiga, sendo A indicando a integridade da amostra em função da variação do dano acumulado e B representando a sensibilidade do material ao nível de deformação aplicado.

Projeto de mistura

Para o projeto de mistura foi adotado o procedimento de dosagem pelo método *Superpave*. A partir do corpo de prova dosado no teor ótimo, foram avaliadas as propriedades: Massa específica aparente e massa específica máxima teórica (Rice test) - ABNT NBR 15619; Propriedades volumétricas: volume de vazios (VV) - DNIT 449 - PRO, vazios no agregado mineral (VAM) - DNIT 449 – PRO; relação betume vazios (RBV) - DNIT 449 – PRO e Adesividade – DNER ME 078; Propriedades mecânicas: estabilidade e fluência - DNIT 447 - ME; Determinação da resistência à tração por compressão diametral - DNIT 136 – ME e resistência ao dano por umidade induzida (DUI) – DNIT 180 – ME.

Teste roda de Hamburgo em misturas asfálticas compactadas - DWT Test (*Test Double Wheel Tracker*)

Uma das maneiras de compreender o desempenho da mistura sob a ação do tráfego e do clima ao longo do tempo e assim investigar a resistência à deformação permanente, é por meio do ensaio de DWT *test*, regido pela norma AASHTO T 324. Para tanto, foram moldados dois corpos de prova de



Andressa Zampieri Rosa,
Gustavo Oliveira Couto, Jesner Sereni Ildefonso,
Thayná Yamamoto Fávero, Gabriela do Prado Ferreira,
Fabrício de França Fernandes e Luiz Henrique de Assis Fagundes

150 mm de diâmetro interno e 60 mm de altura com 7% volume de vazios, sendo a compactação feita no compactador giratório Superpave. Iniciou-se o ensaio com o condicionamento das amostras por 45 min na temperatura do ensaio a 50 °C e o teste foi realizado em 10 mil ciclos, ou 20 mil passadas. A carga aplicada pelo equipamento foi de 703 N no centro da amostra em uma velocidade de 26 ciclos/min. O resultado da resistência à deformação permanente foi obtido por meio da medida do afundamento do cilindro de amostra após os ciclos.

Determinação do módulo de resiliência

A partir do ensaio de módulo de resiliência foi possível simular as condições físicas e os estados de tensão que a mistura será submetida devido ao tráfego. Seguindo o preconizado na norma DNIT 135– ME, os corpos de prova foram condicionados em temperatura de 25 °C para a realização do ensaio. No corpo de prova foram aplicadas tensões de forma repetida, com tensão de confinamento nula. Foi controlado o pulso, duração e frequência de aplicação de carga em cinco sequências de 50 ciclos cada, onde a tensão principal (MPa) foi variável em cada ciclo de 0,1 a 0,5, com aumento gradual de 0,1 MPa por ciclo. O resultado foi determinado a partir da curva de deslocamento em função do tempo.

RESULTADOS

A seguir serão detalhados os resultados obtidos para a formulação em questão, conforme os ensaios descritos anteriormente em relação à avaliação do ligante e da mistura.

Classificação PG

Com base nos valores obtidos no ensaio de cisalhamento dinâmico (conforme Tabela 3), foi possível realizar a leitura do módulo complexo de cisalhamento (G^*) por temperatura e do ângulo de fase, que decresceram na medida em que a temperatura aumentou. O percentual de deformação e a frequência angular foram contínuos em 10% e 10 rad/s, respectivamente, para todas as temperaturas e foi considerado o valor de 2,2 kPa como critério de falha.

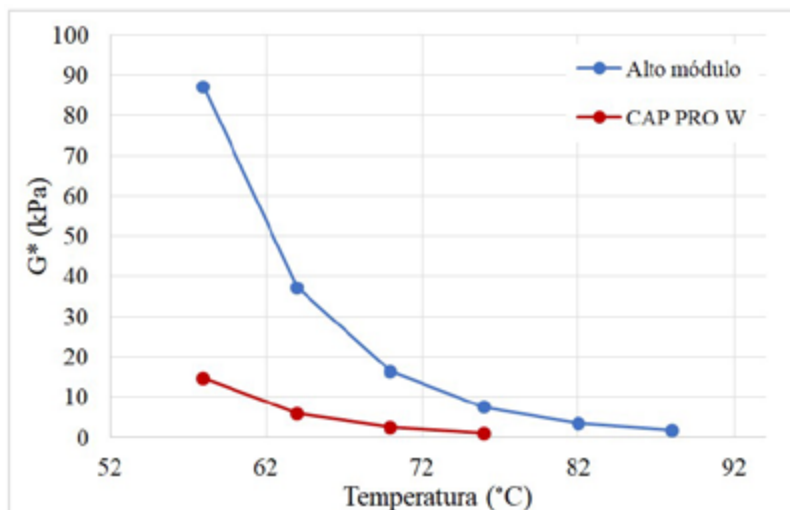
Tabela 3. Resultados classificação PG (Alto módulo)

Freq. Ang. (Rad/s)	Temp. (°C)	Tensão osc. (Pa)	Deformação %	Ângulo de fase	G^* kPa	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Passou/ Falhou
10	58	1,94	2,2	68,1	87,0	93,5	Passou
10	64	1,97	5,3	71,8	37,2	39,2	Passou
10	70	1,66	10,1	74,9	16,3	16,9	Passou
10	76	0,75	10,1	77,4	7,43	7,61	Passou
10	82	0,36	10,1	79,6	3,52	3,58	Passou
10	88	0,17	10,1	81,5	1,73	1,75	Falhou

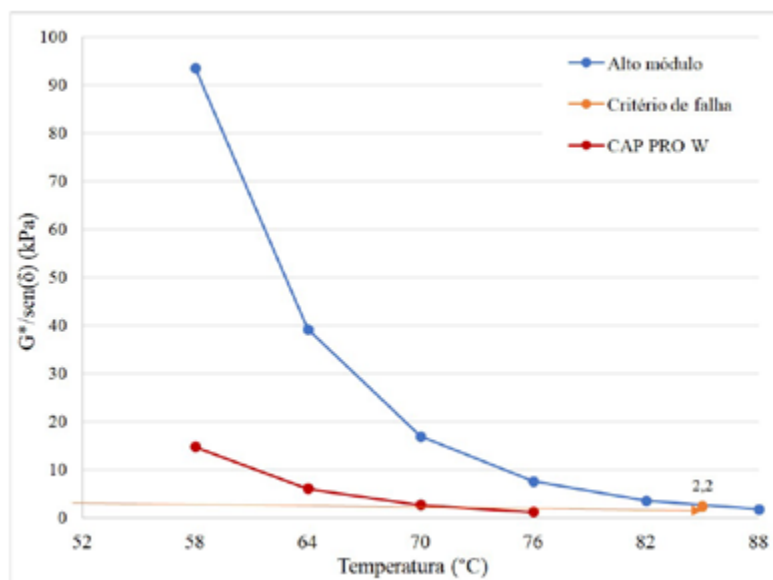
Para as amostras ensaiadas, o PG encontrado foi de 82, com um G^* igual a 3,52 kPa para o ligante modificado. Por meio do teste foi possível correlacionar a leitura do parâmetro G^* em diferentes temperaturas e comparar com os valores obtidos na amostra do CAP PRO W, conforme a Figura 1.



DOI: 10.29327/1430212.49-31

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO DE ASFALTO DE ALTO MÓDULO
MODIFICADO COM POLÍMERO À BASE DE POLIETILENO E SUA INFLUÊNCIA EM MISTURA ASFÁLTICA MORNAFigura 1. Variação de G^* em função da temperatura

Outro ponto de análise foi a variação do parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ (Figura 2), representando a deformação permanente, logo quanto maior essa relação, maior será a resistência à deformação permanente.

Figura 2. Percentual de alteração de $G^*/\text{sen}(\delta)$

Nas Figuras 1 e 2, os gráficos relacionam a taxa de cisalhamento pela temperatura, indicando elevadas respostas às aplicações de cargas, em temperaturas em que asfaltos convencionais não desempenhariam. As amostras apresentaram rigidez elevada, representadas na leitura do G^* e dinâmica ($G^*/\text{sen}(\delta)$) mantendo padrões próximos, indicando as respostas viscoelásticas, mesmo em função de variações da frequência de aplicação de carga. Além dessas correlações, também foi investigado o percentual de alteração do ângulo de fase, apresentado na Figura 3.



Andressa Zampieri Rosa,
Gustavo Oliveira Couto, Jesner Sereni Ildefonso,
Thayná Yamamoto Fávero, Gabriela do Prado Ferreira,
Fabrício de França Fernandes e Luiz Henrique de Assis Fagundes

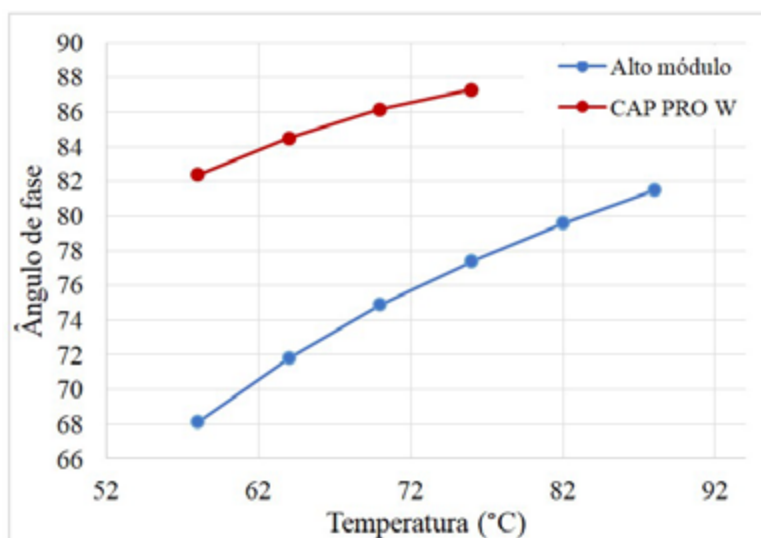


Figura 3. Variação do ângulo de fase em função da temperatura

Na figura 3, o ângulo de fase apresenta, nas temperaturas mais baixas, um comportamento plástico e solidez mais evidentes, conforme a temperatura se eleva, as dissipações de energia no sistema são maiores, mesmo assim, ainda indicam certo comportamento de rigidez, resultando, em uma baixa tendência à deformação permanente.

Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas – MSCR

Para a avaliação da deformação permanente por meio do ensaio MSCR, foram analisados o percentual de recuperação (R) e compliância não recuperável (J_{nr}) dos ligantes e os resultados estão expressos na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de recuperação e compliância não recuperável para a formulação

Parâmetro	Alto módulo	PRO W
Temperatura de teste	82,00	70,00
Recuperações a 100 Pa (R, %)	23,86	1,06
Recuperações a 3200 Pa (R, %)	2,33	-0,01
Rdiff - Diferença média entre as recuperações em 100 Pa e 3200 Pa (%)	90,22	100,95
Compliâncias a 100 Pa (J_{nr} , kPa ⁻¹)	1,66	3,82
Compliâncias a 3200 Pa (J_{nr} , kPa ⁻¹)	3,22	4,15
$J_{nr,diff}$ - Diferença média percentual entre as compliâncias não recuperáveis em 100 Pa e 3200 Pa	94,43	8,85

A observação das recuperações em diferentes tensões, nomeadamente a 100 Pa e 3200 Pa, indica uma notável diferença, evidenciada pela grande disparidade entre os valores de recuperação (23,86% e 2,33%, respectivamente) e pelo índice de diferença média percentual entre essas recuperações (90,22%). Tal disparidade sugere uma significativa dependência do comportamento de recuperação em relação à tensão aplicada. Além disso, a análise das compliâncias não recuperáveis, expressas em 100 Pa e 3200 Pa, juntamente com o índice de diferença média percentual entre elas (94,43%), destaca a sensibilidade do ligante asfáltico à variação de tensão e



DOI: [10.29327/1430212.49-31](https://doi.org/10.29327/1430212.49-31)

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO DE ASFALTO DE ALTO MÓDULO
MODIFICADO COM POLÍMERO À BASE DE POLIETILENO E SUA INFLUÊNCIA EM MISTURA ASFÁLTICA MORNA

sua capacidade de recuperação. Para a amostra analisada, os resultados são esperados, uma vez que não foi adotada a implementação de polímeros SBS para dar essa caracterização de recuperação elástica em maiores tensões aplicadas, entretanto, indica altas resistências ao cisalhamento em altas temperaturas, mesmo com o ligante apresentando condições fluidas.

A classificação, portanto, do ligante, sob as condições de PG 82, foi de tráfico médio (“S” *Standard*), entretanto, pode apresentar resistências a tráfegos mais intensos em condições de menores temperaturas.

Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear – LAS

O ensaio simulou a fadiga no ligante de forma acelerada, por meio do princípio do dano contínuo viscoelástico. Para o CAP PRO W os valores de Fadiga A e B foram respectivamente 2571225 e 3,31, já para o CAP Alto módulo 2872894 e 3,16. A junção dos valores de Fadiga A e B são constantes calculadas que se referem ao momento em que as tensões ocorridas se tornarão o ponto de fadiga após a sua aplicação. Os valores encontrados estão próximos, entretanto, o material de alto módulo possui uma vantagem na sua resistência a fadiga, representado na Figura 4 por meio da análise de número de ciclos em função da amplitude de deformação.

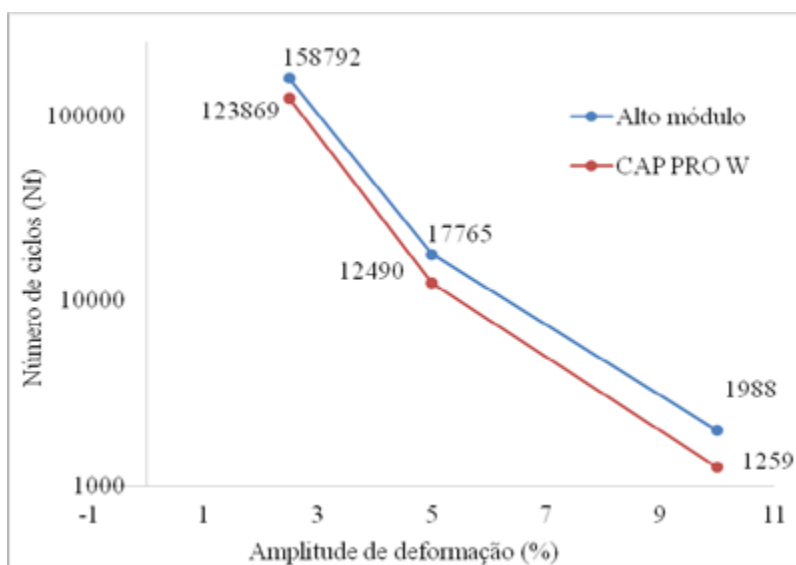


Figura 4. Parâmetro de fadiga

Com a análise do número de ciclos em função da amplitude de deformação, foi possível analisar a resistência da amostra, em que, com a redução no número de ciclos, houve aumento da amplitude de deformação, demonstrando o comportamento de fadiga. Maior amplitude de número de ciclos representa uma maior resistência à fadiga, portanto o ligante modificado obteve melhores resultados, suportando maior quantidade de ciclos.

Dosagem do corpo de prova e avaliação das propriedades

A dosagem foi realizada pelo método *Superpave*, e por se tratar de uma mistura morna, o agregado estava na temperatura de 120 °C, o ligante 153 °C e a compactação foi feita no compactador giratório a 120 °C. Os resultados encontrados foram de 5,03 % para o teor ótimo de ligante,



Andressa Zampieri Rosa,
Gustavo Oliveira Couto, Jesner Sereni Ildefonso,
Thayná Yamamoto Fávero, Gabriela do Prado Ferreira,
Fabrício de França Fernandes e Luiz Henrique de Assis Fagundes

volume de vazios igual a 4 %, relação betume/vazios 75,44 %, estabilidade 13,25 kN, Fluência 5,22 mm, resistência à tração por compressão diametral 2,77 MPa, resistência ao dano por umidade induzida 95,06 % e adesividade satisfatória.

Teste roda de Hamburgo em misturas asfálticas compactadas – DWT

Para avaliar a capacidade de resistência à deformação permanente da mistura, realizou-se o teste roda de Hamburgo a temperatura de 50 °C. Na Figura 5 é possível observar a variação de ciclos em função da amplitude de deformação até o rompimento do corpo de prova.

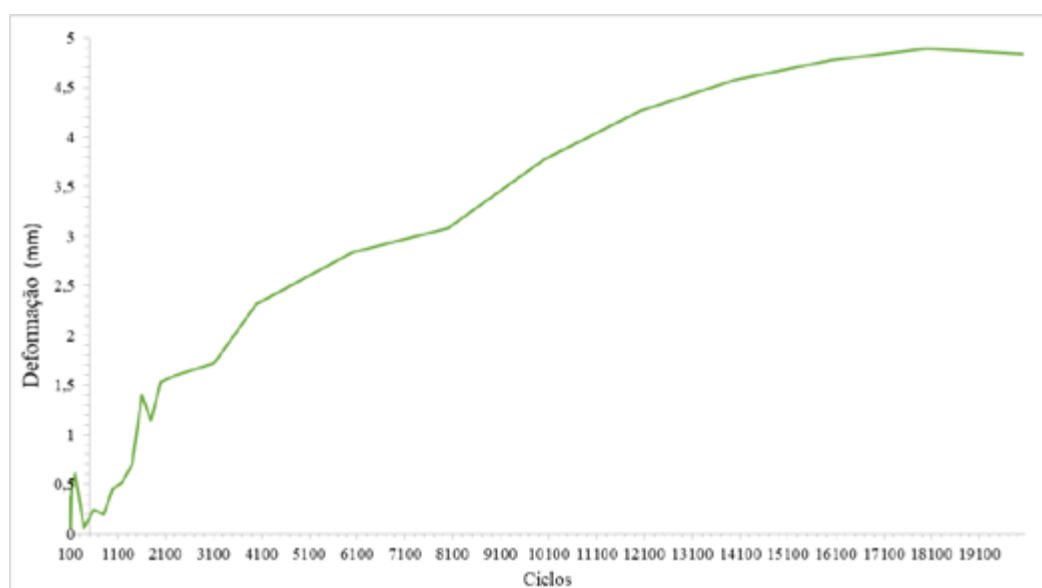


Figura 5. Variação de ciclos na ruptura em função da amplitude de deformação

Ao verificar o resultado obtido no ensaio, após os efeitos de deformação a profundidade final do acúmulo de deformações foi de 4,84 mm, o que corresponde a 8,06% da altura inicial do corpo de prova, sendo assim, o ligante e o método de dosagem adotado proporcionaram baixa deformação permanente, correspondendo com o levantamento reológico somado à escolha de faixa granulométrica graúda.

Determinação do módulo de resiliência

A fim de se obter a capacidade de recuperação elástica da massa asfáltica, realizou-se o ensaio de determinação do módulo de resiliência, adotando resistência à tração de 2,77 MPa. O resultado obtido foi de 52247 MPa em média, pela análise de três corpos de prova, com coeficiente de *Poisson* igual a 0,30, o que indica uma rigidez elevada, que é proporcionada tanto pelo ligante de alto desempenho quanto a escolha de agregados de maior graduação. Além da rigidez, o material também exibiu recuperação em resposta à carga aplicada. Este resultado, em conjunto com a baixa deformação permanente pela Roda de Hamburgo, sugere que o conjunto possui capacidade de suportar o tráfego e resistir à deformação de cargas.

Relacionar os dois ensaios é de grande valia para uma análise abrangente do desempenho dos materiais adotados para o experimento. Enquanto o módulo de resiliência destaca a capacidade da



DOI: [10.29327/1430212.49-31](https://doi.org/10.29327/1430212.49-31)

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO DE ASFALTO DE ALTO MÓDULO
MODIFICADO COM POLÍMERO À BASE DE POLIETILENO E SUA INFLUÊNCIA EM MISTURA ASFÁLTICA MORNA

recuperação à forma original, a deformação permanente apresenta os limites do material em condições de tráfego prolongado.

CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de uma mistura asfáltica de alto módulo utilizando ligante modificado de alto módulo e compactado em menores temperaturas que o convencional. Os resultados apresentados destacam o promissor desempenho do ligante de alto módulo e a possibilidade de trabalhá-lo na modalidade de mistura morna, mantendo a viscosidade próxima à de um ligante convencional, o que auxilia o processo de usinagem, porém, garantindo as propriedades de um ligante alto módulo com consumo de energia reduzido.

Referente às análises do comportamento reológico, o ligante se mostrou com bom desempenho, com maior resistência à fadiga e deformação permanente se comparado ao não modificado, o que proporciona pavimentos ainda mais resistentes ao tráfego e às condições climáticas. Em relação aos resultados do ensaio de roda de Hamburgo e módulo de resiliência, a mistura indicou boa capacidade de suporte de carga, por meio do ensaio de módulo, e a baixa deformação plástica (representada pelo ensaio de DWT) oferece a avaliação ao longo da vida útil.

Por fim, este estudo possibilita a investigação sobre a viabilidade de desenvolver vias de desempenho elevado garantindo menor consumo energético. Para que isso aconteça, todos os materiais devem manter um controle de processo detalhado, uma vez que os produtos apresentam características únicas. Em relação às limitações apresentadas, estas se dão na validade dos resultados, somente para as condições avaliadas nessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO M332-21 – Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. 2021.

AASHTO T324-22 – Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures. 2022.

AASHTO T315-10 – Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). 2010.

ASTM D7643 - Standard Practice for Determining the Continuous Grading Temperatures and Continuous Grades for PG Graded Asphalt Binders. 2016.

AFNOR P98-140 – Enrobés Hidrocarbonés – Couches d'assises: Enrobé à Module Élevé (EME). 1999.

ALMEIDA-COSTA, Ana; BENTA, Agostinho. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2308-2317, 2016.

BENTA, Agostinho et al. Design and performance of a warm high-modulus asphalt concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p. 55-65, 2015.

BROSSEAUD, Yves. Les enrobés à module élevé (EME): Bilan de l'expérience française et transfert de technologie. **7º Congrès National de la Route**, 2006.

CAPITÃO, Silvino Dias; PICADO-SANTOS, Luís. Assessing permanent deformation resistance of high modulus asphalt mixtures. **Journal of transportation engineering**, v. 132, n. 5, p. 394-401, 2006.

DNER 054/1997 – ME: Equivalente de areia – Método de ensaio. 1997.

DNIT 446/2024 – ME: Agregados – Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio – Método de ensaio



Andressa Zampieri Rosa,
Gustavo Oliveira Couto, Jesner Sereni Ildefonso,
Thayná Yamamoto Fávero, Gabriela do Prado Ferreira,
Fabrício de França Fernandes e Luiz Henrique de Assis Fagundes

- DNIT 411/2021 – ME: Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. 2021.
- DNIT 439/2022– ME: Pavimentação – Ligante asfáltico – Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep) – Método de ensaio. 2022.
- DNIT 447/2024 – ME: Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall – Método de ensaio. 2024.
- DNIT 136/2018 – ME: Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. 2018
- GENG, Han; CLOPOTEL, Cristian S.; BAHIA, Hussain U. Effects of high modulus asphalt binders on performance of typical asphalt pavement structures. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 207-213, 2013.
- HAMZAH, Meor Othman; JAMSHIDI, Ali; SHAHADAN, Zulkurnain. Evaluation of the potential of Sasobit® to reduce required heat energy and CO2 emission in the asphalt industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 18, p. 1859-1865, 2010.
- HARITONOV, Viktors et al. Development of high performance asphalt concrete using low quality aggregates. **CIVIL ENGINEERING'13**, v. 100, p. 197, 2013.
- LIANG, Ming et al. Effects of SBS configuration on performance of high modulus bitumen based on dynamic mechanical analysis. **Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske**, v. 65, n. 7-8, p. 379-384, 2016.
- MA, F.; FU, Z. Application of hard asphalt and high modulus asphalt concrete in France. **Journal of China & Foreign Highway**, v. 28, n. 6, p. 221-223, 2008.
- MA, Tao et al. Laboratory performance characteristics of high modulus asphalt mixture with high-content RAP. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 975-982, 2015.
- NBR 16974/2022: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. 1998.
- NBR 12583/2017 - Determinação da adesividade ao ligante betuminoso. 2017.
- NBR 15617/2015 – ME: Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. 2015.
- NBR 11341: Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso Cleveland. 2014.
- NBR 15184: Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. 2021.
- NBR 15235: Materiais asfálticos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. 2009.
- NBR 6293: Ligantes asfálticos – Determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, 2015.
- NBR 6560: Ligantes asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. 2016.
- NBR 6576: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. 2007.
- NBR 7809: Agregado miúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. 2019.
- RUBIO, M. C. et al. Warm Mix Asphalt: an Overview *Journal of Cleaner Production*, 24. 2012.
- VILLELA, Assis Rodrigues Abbud. Estudo de camada de base asfáltica de módulo elevado para restauração de rodovias de tráfego muito pesado. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- WANG, Chao et al. Experimental study on rheological characteristics and performance of high modulus asphalt binder with different modifiers. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 26-36, 2017.
- XIAO, Feipeng et al. Impacts of high modulus agent and anti-rutting agent on performances of airfield asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 1-9, 2019.
- ZHANG, Ran et al. High temperature performance of SBS modified bio-asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 99-105, 2017.



ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM MISTURA ASFÁLTICA COM ALTA RESISTÊNCIA A FADIGA

Anna Clara Nascimento de Abreu¹, Fernando Silva Albuquerque².

RESUMO

Um dos maiores desafios na pavimentação é melhorar o desempenho estrutural de um pavimento, possibilitando a maior vida útil possível com a minimização de falhas mecânicas como trincas por fadiga, que são geradas devido ao fluxo de veículos pesados na via. Quanto maior esse fluxo e mais pesados os veículos, maiores são essas tensões e maiores são as chances de danos ao pavimento. A ampliação da vida de fadiga de uma mistura asfáltica ajuda a prevenir esse tipo de problema, sendo possível otimizar o dimensionamento da estrutura do pavimento, gerando conforto aos usuários e economia em sua manutenção. O presente estudo tem como objetivo comparar três métodos de dosagem de misturas asfálticas de alta resistência à fadiga e estudar o comportamento das misturas resultantes, analisando também o impacto que os fatores como volume de vazios, granulometria e teor de ligante tem sobre a vida de fadiga. As misturas dosadas não apresentaram valores de módulo de resiliência distintos do usual. O melhor desempenho no ensaio de vida de fadiga para tensões de tração elevadas aconteceu para a mistura com granulometria densa, mas com menor percentual de cimento asfáltico de petróleo entre as três avaliadas (4% Vv e cerca de 5,17% de CAP). Já as misturas com maiores teores de CAP (3% de Vv e 5,55% de CAP; e 0,5% a mais de CAP, resultando em 2,69% de Vv e 5,67% de CAP) tiveram melhores desempenhos para baixas tensões de tração.

PALAVRAS-CHAVE: Mistura asfáltica resistente à fadiga; mistura asfáltica de alta densidade; vida de fadiga.

ABSTRACT

One of the biggest challenges in pavement engineering is enhancing the structural performance of a pavement, aiming for the longest possible service life while minimizing mechanical failures such as fatigue cracks, which are generated due to heavy traffic flow on the road. The higher the traffic flow and the heavier the vehicles, the greater the stresses and the higher the chances of pavement damage. Extending the fatigue life of an asphalt mixture helps prevent such problems, enabling optimization of pavement structure design, providing comfort to users, and saving on maintenance costs. This study aims to compare three methods of asphalt mixture design for high fatigue resistance and investigate the behavior of the resulting mixtures, also analyzing the impact of factors such as void volume, granulometry, and binder content on fatigue life. The dosed mixtures did not show significantly different resilient modulus values from the norm. The best performance in the fatigue life test for high tensile stresses occurred for the mixture with high particle density but with a lower percentage of petroleum asphalt cement among the three evaluated (4% void volume and approximately 5.17% of CAP). On the other hand, mixtures with higher CAP contents (3% void volume and 5.55% of CAP; and an additional 0.5% of CAP, resulting in 2.69% void volume and 5.67% of CAP) performed better for low tensile stresses.

KEY WORDS: Fatigue-resistant asphalt mixture; high-density asphalt mixture; fatigue life.

¹ Universidade Federal de Sergipe – UFS. e-mail: claireabreu@hotmail.com; albuquerque.f.s@academico.ufs.br



INTRODUÇÃO

No Brasil, o modal rodoviário é responsável por grande parte do transporte de cargas e pelo deslocamento de pessoas. De acordo com o boletim da Pesquisa CNT de Rodovias (2022), o modal rodoviário brasileiro é responsável por 65% da movimentação de mercadorias e de 95% da de passageiros, mas apenas 44,5% da extensão da malha rodoviária pode ser enquadrada num estado ótimo ou bom. Vale ressaltar que, da extensão de vias defeituosas, 40,6% apresentavam problemas estruturais, como trincamento, deformação plástica ou deterioração total.

Segundo Bernucci et al. (2008), compete ao projetista dimensionar pavimentos seguros, e que ofereçam conforto e segurança aos usuários. Contudo, é requerido ainda que o projeto de tal estrutura deva garantir o máximo desempenho funcional e estrutural do pavimento durante o período de projeto, apresentando a melhor relação benefício/custo possível.

O projeto de misturas asfálticas no Brasil é geralmente feito por dosagem Marshall (DNER-ME 043/95), que é um processo de análise volumétrica bem criterioso e com o uso de curvas granulométricas pré-definidas, mas sem avaliação do comportamento mecânico de forma racional. A interação entre o esqueleto pétreo e o ligante asfáltico não é avaliada, nem como podem ser utilizadas para a finalidade de resistir aos esforços repetitivos causadores de trincamentos por fadiga. Em contrapartida, vale citar aqui várias iniciativas que surgiram nos Estados Unidos nos últimos 40 anos, como a dosagem Superpave e o mais recente Balanced mix design, que focam no aprimoramento de características físicas da mistura que impactam nos seus desempenhos mecânicos.

Trincas são danos à estrutura de um pavimento, que surgem geralmente devido a fadiga de uma camada cimentada. Caracteriza-se por um processo de ruptura ou perda excessiva de rigidez que ocorre quando o material é solicitado repetidamente por carregamentos durante uma quantidade suficiente de vezes ao longo do tempo (HUANG, 2004).

O surgimento de trincas por fadiga em um pavimento é considerado um dano estrutural que inicia uma série de defeitos funcionais ao pavimento. Uma vez o revestimento de um pavimento trincado, as águas das chuvas infiltrarão nas trincas, podendo promover erosão e formação de panelas, bem como deformações plásticas em camadas inferiores, por perda de desempenho mecânico com o aumento da umidade (MEDINA *et al.*, 2015).

O estudo da vida de fadiga em um pavimento ajuda a prevenir esse tipo de problema, sendo possível projetar um pavimento de forma racional com uma vida de serviço otimizada. Além disso, um dos benefícios é a geração de conforto aos usuários da via, e economia na diminuição do uso de recursos naturais e gastos com manutenções ao longo do tempo.

Misturas asfálticas de alta resistência à fadiga são especialmente indicadas para concepções de pavimentos perpétuos (NEWCOMB *et al.*, 2001; S GIREESH KUMAR *et al.*, 2018). Elas são aplicadas na sub-base dessas estruturas constituídas por três camadas de misturas asfálticas com finalidades distintas. A sub-base dos pavimentos perpétuos é a camada destinada a absorver os esforços de tração da estrutura. Para atingir ao objetivo de uma camada de alta resistência à fadiga, o principal fator alterado é a maior quantidade de ligante asfáltico usado. Embora não haja uma padronização de processo para esse objetivo, há três estratégias normalmente utilizadas para esse fim em diretrizes para concepção de pavimentos perpétuos (NEWCOMB *et al.*, 2010): a) utilização de esqueleto granulométrico de alta densidade; b) redução do índice de vazios da mistura; e c) adição de certa quantidade de ligante asfáltico à mistura previamente dosada.



DOI: [10.29327/1430212.49-33](https://doi.org/10.29327/1430212.49-33)

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM MISTURA ASFÁLTICA COM ALTA RESISTÊNCIA A FADIGA

A presente pesquisa teve como objetivo comparar o desempenho à fadiga de três misturas asfálticas dosadas a partir de cada uma das diretrizes citadas anteriormente (NEWCOMB *et al.*, 2010) com o desempenho à fadiga de uma mistura asfáltica dosada com granulometria enquadrada na faixa B do DNIT 031/2006-ES e 4% de vazios.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item é realizada uma breve revisão bibliográfica sobre misturas de alta resistência à fadiga apropriadas aos pavimentos perpétuos.

A técnica de pavimentação perpétua surgiu por volta dos anos 2000, com a intenção de aumentar o tempo de vida útil da pavimentação em 50 anos e reduzir custos como reconstrução. Isso é possível devido a sua elevada resistência, havendo assim pouca necessidade de reparos profundos e manutenções, reduzindo custos, além de baixa utilização de materiais, sendo possível a reciclagem de materiais retirados nas manutenções (NEWCOMB *et al.*, 2010).

Nessas estruturas, cada uma das três camadas asfálticas do pavimento perpétuo tem uma função diferente. O revestimento é dedicado a sofrer desgaste causado pelo contato pneu-pavimento e não tem função estrutural. A base asfáltica de alto módulo é dedicada a conter as deformações permanentes. Já a camada asfáltica de sub-base tem função de resistir aos esforços de tração predominantes nela, sendo projetada para ter alta resistência à fadiga (NEWCOMB *et al.*, 2001).

Especificamente sobre as misturas asfálticas de alta resistência à fadiga, distintos procedimentos para atingir esse objetivo já foram estudados. Reuniram-se aqui algumas diretrizes que podem conduzir a misturas asfálticas com característica de alta resistência à fadiga:

- Misturas asfálticas com granulometria densa tem melhor desempenho de vida de fadiga, pois melhoram as proporções e a interação entre agregados de diversos diâmetros, especialmente com o aumento da graduação fina. Além disso, amplia a quantidade de mástique asfáltico e sua eficácia na ação coesiva da mistura (NEJAD *et al.*, 2010).
- Segundo Tarefder *et al.* (2009), embora as camadas de alta resistência à fadiga devam possuir uma granulometria de alta densidade, o diâmetro máximo nominal da granulometria alvo deve variar de acordo com a espessura da camada, com objetivo de evitar deformações permanentes. Os diâmetros nominais máximos podem variar de 19 mm, para espessura de camada entre 60 a 75 mm, 25 mm, para espessura de camada entre 75 e 100 mm, e 37,5 mm, para espessuras superiores a 100 mm.
- Ao analisar as faixas granulométricas da norma DNIT 031/2006-ES, apenas a faixa “B”, com diâmetro nominal máximo de 25 mm poderia ser utilizada com o objetivo de obter mistura asfáltica de alta resistência à tração. A mesma é apropriada para camadas de ligação e de revestimento, e apresenta características de granulometria densa, mas com alta amplitude. Portanto, essa faixa granulométrica apropriada para misturas de alta resistência à fadiga poderia ter limites inferior e superior ainda mais ajustados.
- Como é de conhecimento amplo, a quantidade de CAP na mistura é inversamente proporcional ao volume de vazios (Vv) da mistura, ou seja, quanto mais CAP menor o Vv (BERNUCCI *et al.*, 2022). Em uma análise simples, uma maior quantidade de CAP poderia fornecer uma maior vida de fadiga à mistura asfáltica, ou seja, a redução do Vv da mistura poderia ser um dos objetivos da dosagem.
- Embora o maior teor de ligante possa trazer uma maior resistência à fadiga para a mistura,



essa proporção deve ser dosada criteriosamente, pois, ao aumentar a quantidade de asfalto de forma indiscriminada, a mistura pode perder resistência à deformação permanente (BERNUCCI *et al.*, 2022).

- Além disso, uma quantidade excessiva de ligante asfáltico livre pode fornecer superfícies sem formação de mástique e, conseqüentemente, formar uma superfície de fragilidade à mistura (NEJAD *et al.*, 2010).

MÉTODOLOGIA

Caracterização dos materiais

O ligante asfáltico usado no presente estudo foi o CAP 50/70 (RLAM – Bahia). Os resultados dos ensaios de caracterização de viscosidade rotacional podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados do ensaio de viscosidade rotacional.

Ensaio	Viscosidade (cP)	Valor Mínimo (cP)
Viscosidade Brookfield, 135°, SP 21, 50 rpm	377	274
Viscosidade Brookfield, 149°, SP 21, 50 rpm	199	112
Viscosidade Brookfield, 177°, SP 21, 120 rpm	71	57 a 285

A granulometria é parte muito importante nesse tipo de mistura, pois influencia decisivamente no teor ótimo de ligante a ser usado. Para obtenção da granulometria utilizada, foram consideradas faixas granulométricas com diâmetro máximo adequado a camadas com espessuras maiores ou iguais a 75 mm (diâmetro máximo de 25 mm). Foram selecionadas duas faixas granulométricas específicas para sub-bases de pavimentos perpétuos e uma faixa granulométrica brasileira que poderia ser utilizada para a mesma finalidade: a) faixa granulométrica utilizada na Índia e China (KURMAR, 2017) e b) faixa B do DNIT 031/2006-ES. A curva alvo utilizada nessa pesquisa foi determinada de forma que melhor se enquadrasse nessas duas faixas.

Dessa forma, como pode ser observado no gráfico da Figura 1 (traçado com diâmetro da peneira elevada à potência 0,45 para observar a linha de densidade máxima), a curva granulométrica alvo (CAARF) é de alta densidade e atendeu as duas faixas granulométricas adotadas. Um fator a se destacar é que a faixa B do DNIT 031/2006-ES abrangia grande parte da faixa granulométrica adotada na Índia e China, ou seja, essa última é mais restrita que a nacional, pois é apropriada para o objetivo de misturas de alta resistência à fadiga. A granulometria “controle” é utilizada para misturas asfálticas do tipo Binder e foi utilizada nesse trabalho para um concreto asfáltico com desempenho considerado “padrão”.

Após definida a granulometria a ser utilizada, foi obtido o teor ideal de CAP para a mistura. O método utilizado foi a dosagem Marshall com CAP 50/70.



DOI: 10.29327/1430212.49-33

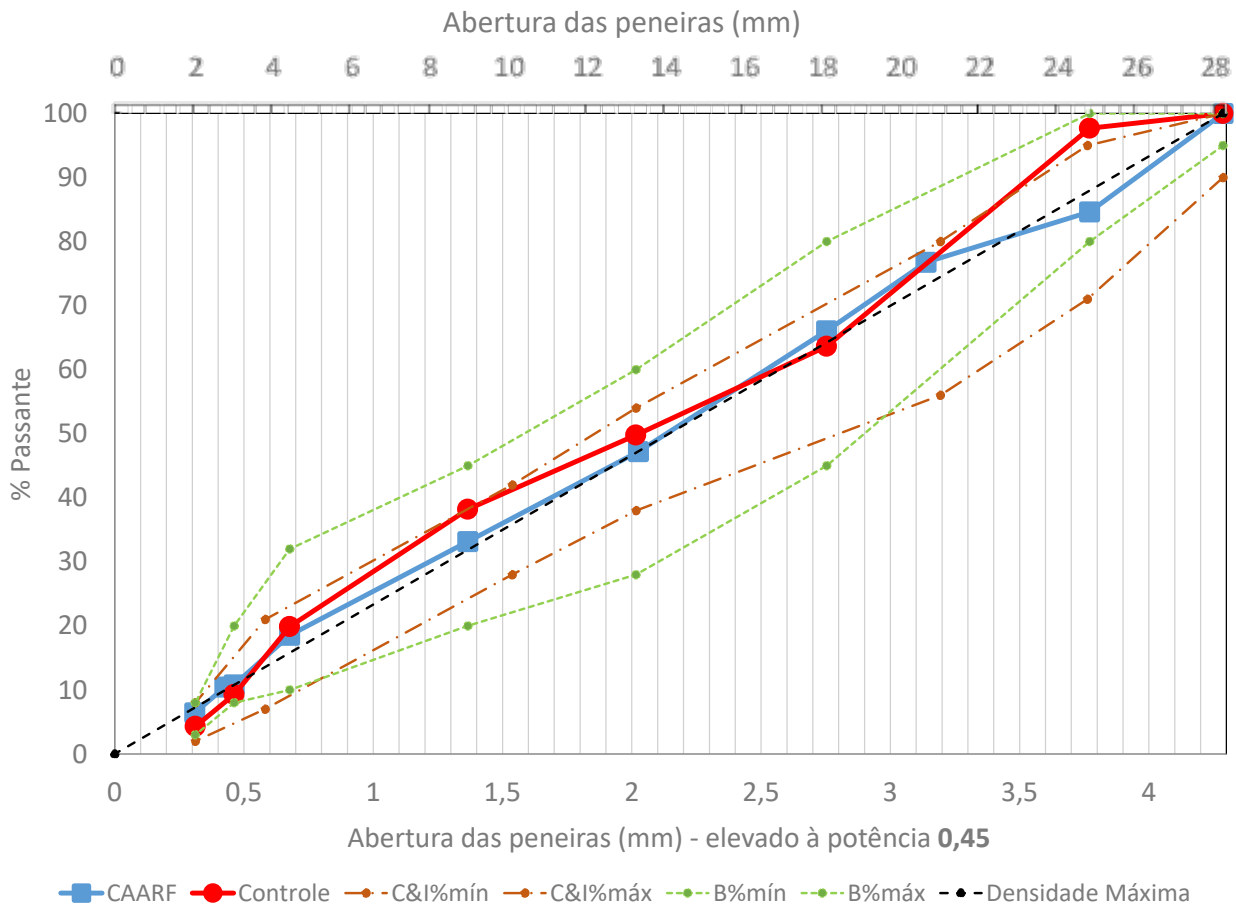
ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE UM MISTURA ASFÁLTICA COM ALTA RESISTÊNCIA A FADIGA

Figura 1. Resultados da granulometria utilizada.

Dosagem Marshall

Nesse trabalho, a curva granulométrica testada foi enquadrada nas duas faixas tomadas como referência e o teor de asfalto alvo foi, em princípio, o que fornecia o volume de vazios (V_v) de 4%. Aplicando o método de dosagem Marshall e baseado no V_v de 4%, o teor de CAP encontrado foi de 5,17%, definido como teor ótimo para o esqueleto mineral da mistura estudada. A relação Betume e Vazios (RBV) correspondente a esse teor foi de 76%. Tanto o V_v , quanto o RBV, estão dentro do intervalo requerido na norma DNIT 031/2006-ES para camadas de rolamento. Esse teor, portanto, foi correspondente ao primeiro método para obtenção de Concreto Asfáltico de Alto Resistência à Fadiga (CAARF01), na qual se atuou especificamente na curva granulométrica (alta densidade) e V_v de 4% (NEWCOMB *et al.*, 2001).

Os outros dois métodos utilizaram a mesma curva granulométrica e dosagem obtidos em CAARF01, mas com algumas especificações distintas, quais sejam: a) o segundo teor de CAP foi correspondente ao V_v de 3% (NEWCOMB *et al.*, 2010), obtendo-se o CAARF02 com teor de ligante de 5,55%; e b) o terceiro teor de CAP foi correspondente ao teor obtido para o CAARF01, adicionando 0,5% de CAP (ANAND *et al.*, 2020), obtendo-se o CAARF03 com teor de asfalto de 5,67% e V_v de 2,69%.

A dosagem da mistura CONTROLE, utilizada para comparação dos resultados de desempenho com



as misturas CAARF, foi realizada com adição de DOPE de 0,5% e resultou em teor de CAP de 4,6%, Vv também de 4,6% e RBV de 70,3%, apropriada às camadas de ligação (Binder).

Obtidos os quatro concretos asfálticos, foram moldados também corpos de prova nas características dosadas (%CAP e %Vv) para as misturas “CONTROLE”, “CAARF01”, “CAARF02” e “CAARF03”, para a realização dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) (DNIT 136/2018-ME), Módulo de Resiliência (MR) (DNIT 135/2018-ME) e Vida de Fadiga (DNIT 183/2018-ME).

RESULTADOS

Resistencia a tração por compressão diametral (RTCD)

Os valores médios obtidos do ensaio de RTCD para cada uma das três misturas podem ser encontrados na Figuras 2.

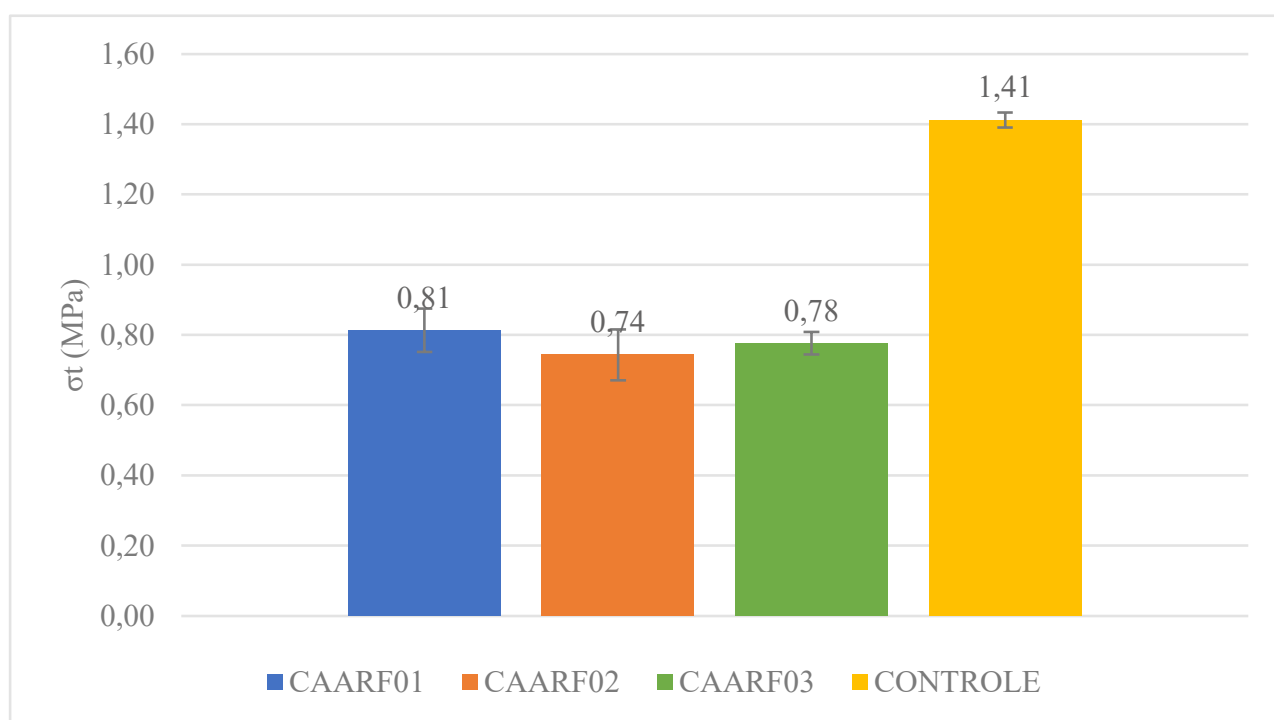


Figura 2. Resultados de RTCD (MPa).

É possível notar que houve um decréscimo nas resistências à tração por compressão diametral, o que é uma característica incomum, pois, com o aumento gradual do teor de ligante, a tendência era aumentar a resistência à tração da mistura.

Uma das possíveis causas para esse comportamento atípico pode ser encontrada nas pesquisas de Don Christensen *et al.* (2007). Segundo o autor, observa-se que quando o teor de CAP supera 5% seu aumento gradual causa a redução da resistência à tração.



DOI: [10.29327/1430212.49-33](https://doi.org/10.29327/1430212.49-33)

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE UM MISTURA ASFÁLTICA COM ALTA RESISTÊNCIA A FADIGA

Módulo de resiliência (MR)

Os resultados de módulo de resiliência estão apresentados na Figura 3. O estudo de Possebon (2018) compara resultados de MR de misturas asfálticas dosadas com CAP 50/70 de várias refinarias brasileiras. O intervalo de MR encontrado por ele foi entre 7173 a 8628 MPa. Pode-se perceber que as três misturas asfálticas aqui estudadas resultaram em MRs menores que essa faixa (5157 a 5486 MPa), ou seja, mais flexíveis. Esse era o objetivo do estudo, sendo alcançado devido à escolha da faixa granulométrica de alta densidade e grande quantidade de filer, o que elevou o consumo de ligante asfáltico, tornando as misturas mais flexíveis. Contudo, não foram detectadas variação relevante nos valores de MR para as misturas dosadas pelos três métodos.

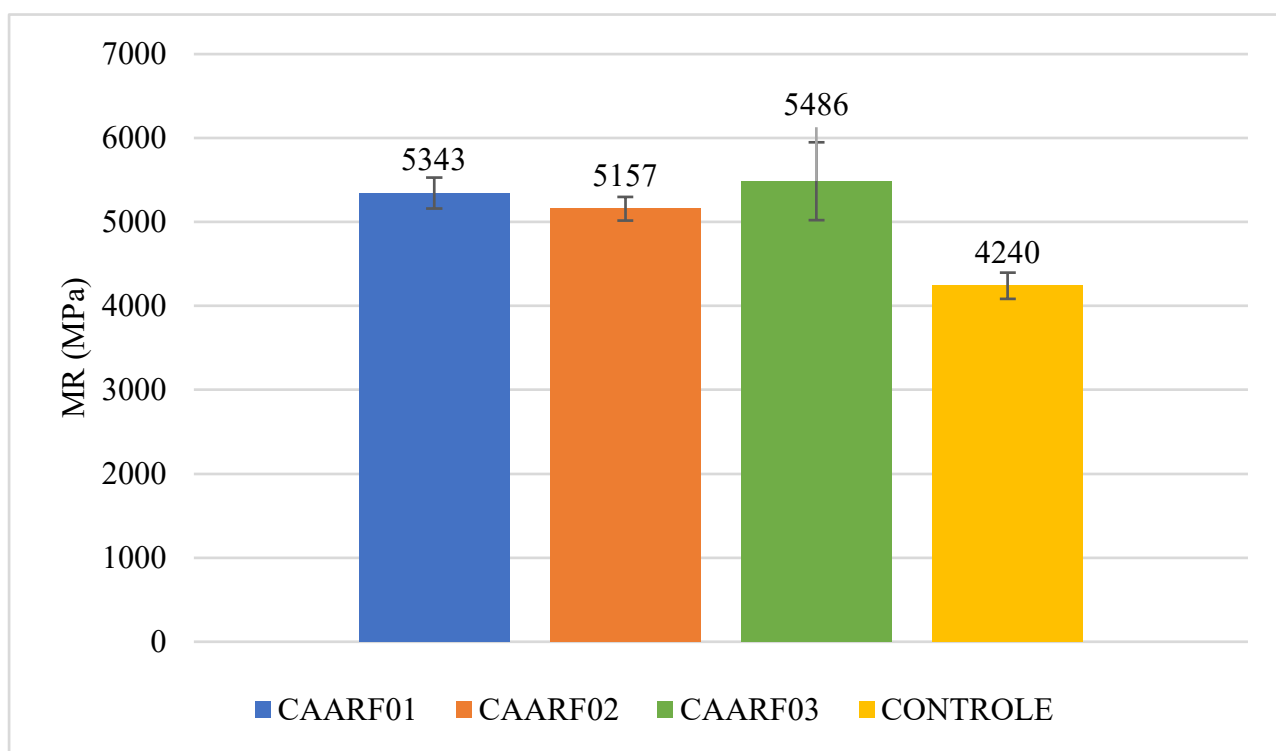


Figura 3. Resultados de MR (MPa).

Ensaio de fadiga por compressão diametral à tração controlada

O ensaio de fadiga é importante para determinar o comportamento de uma mistura asfáltica quando a mesma é submetida a uma força de forma sucessiva até o momento que haja a plastificação do material e este venha a ruptura. Assim, a vida de fadiga é a quantidade de aplicações de uma carga antes da ruptura do CP. Este ensaio seguiu a norma DNIT 183/2018-ME.

Pode-se observar os resultados de fadiga de acordo com os gráficos das Figuras 4, 5 e 6, onde associam os valores de deformação de tração inicial (ϵ), tensão de tração aplicada (σ) e relação percentual da tenção de tração e a RTCD da mistura (%RTCD) com a vida de fadiga (N). Os modelos foram ajustados para curvas potenciais (Figuras 4 e 5) e exponenciais (Figura 6).

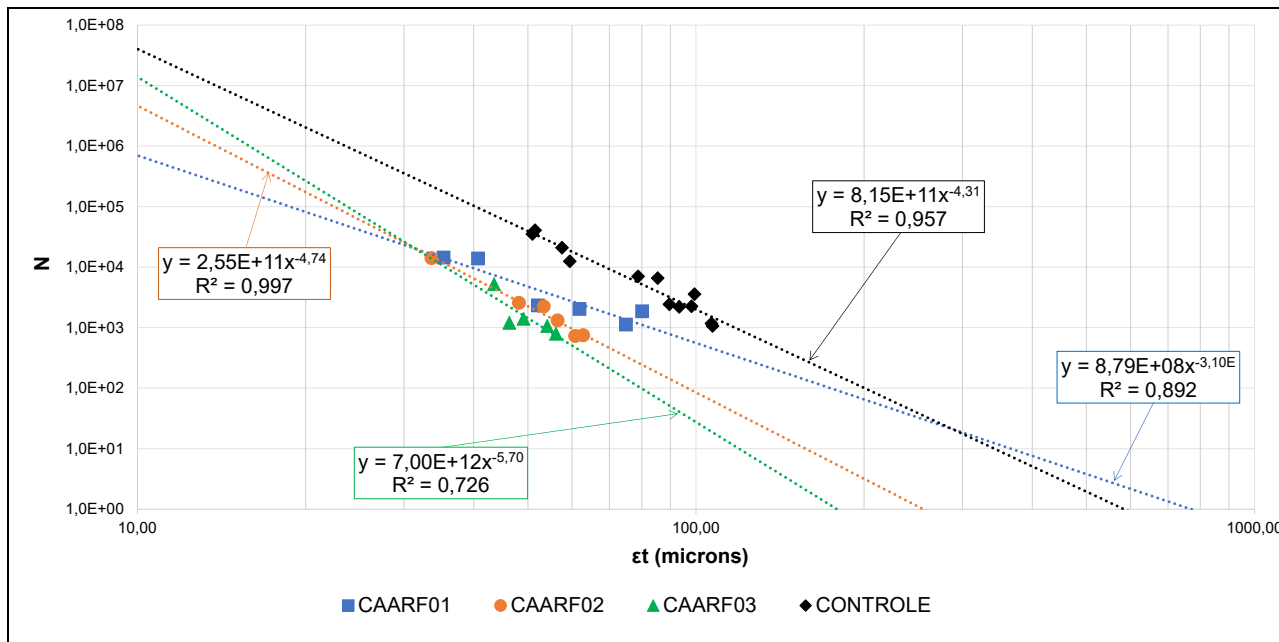


Figura 4. Relação vida de fadiga x deformação de tração inicial.

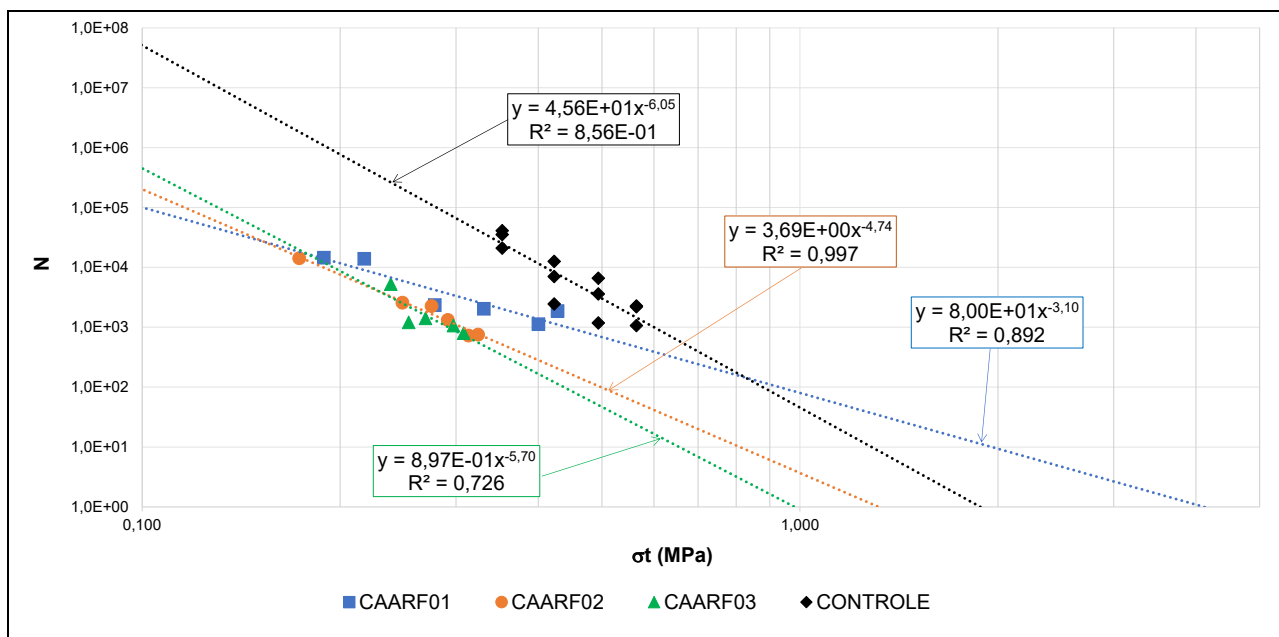


Figura 5. Relação vida de fadiga x tensão de tração.



DOI: 10.29327/1430212.49-33

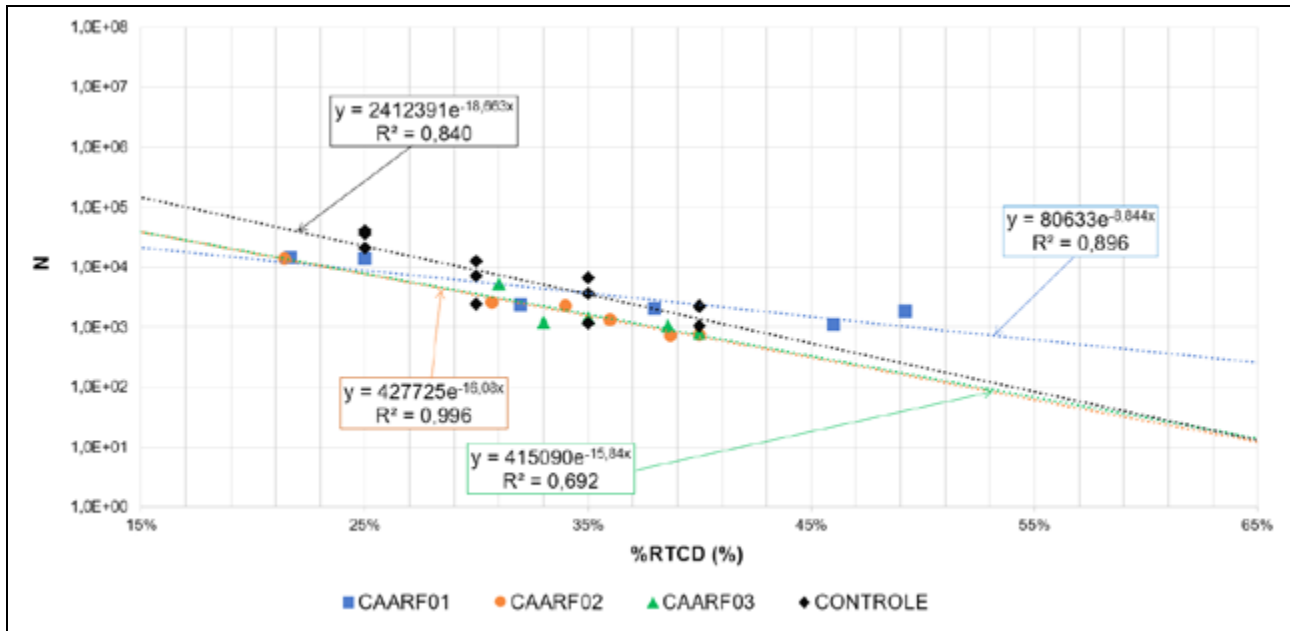
ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE UM MISTURA ASFÁLTICA COM ALTA RESISTÊNCIA A FADIGA

Figura 6. Relação vida de fadiga x % da RTCD.

Percebe-se nas Figuras 3 e 4 que quanto maior é a deformação de tração inicial ou a tensão aplicada no ensaio, menor é o N, comportamento esse esperado, conforme literatura (HUANG, 2004; MEDINA et al., 2015).

O aumento da relação entre tensão de tração aplicada e resistência à tração por compressão diametral (%RTCD) também causa uma diminuição da vida de fadiga. Observa-se que a curva de CAARF01 com volume de vazios de 4% tende a ter uma maior vida de fadiga que as outras três misturas (Figura 6), à medida que a tensão de tração se eleva. Nota-se também que as misturas com maiores teores de CAP (CAARF02 e CAARF03) só seriam vantajosas quando as tensões de tração na camada fossem abaixo de 23% da RTCD, o que poderia limitar suas aplicações. Já a mistura CONTROLE somente seria vantajosa, frente ao CAARF01, para tensões de tração inferiores a 35% da RTCD.

Para a deformação específica de tração, a mistura CAARF01 supera as misturas CAARF02 e CAARF03 em desempenho à fadiga a partir de 30 μ , enquanto supera a mistura CONTROLE a partir de 230 μ .

Somando as duas características de níveis de tensões e deformações de tração, observa-se um ganho qualitativo ao desempenho por fadiga à mistura quando a granulometria selecionada tem densidade aproximada à máxima, especialmente ao comparar com granulometrias típicas de BINDERS.

Foi possível perceber também que os procedimentos adotados para as dosagens do CAARF02 e CAARF03 resultaram em desempenhos à fadiga semelhantes ao analisar as Figuras 4 a 6. Da mesma forma, os seus teores de ligante também foram relativamente semelhantes. Pelo fato da esperada melhora de desempenho à fadiga pelo aumento do teor de ligante não ter se confirmado, reforça a hipótese de Nejad et al. (2010), de que a quantidade excessiva de ligante asfáltico livre pode fornecer superfícies de fragilidade à mistura.

Dessa forma, pela mistura CAARF01 ter menor teor de CAP que as misturas CAARF02 e CAARF03 e por ter o melhor desempenho entre todas as misturas (inclusive a CONTROLE) quando a tensão de tração supera 35% do RTCD, do ponto de vista qualitativo, o procedimento



apropriado de escolha da curva granulométrica próxima a de máxima densidade configurou-se como o melhor caminho, entre os quatro analisados, para obtenção de concreto asfáltico com ganhos na resistência à fadiga.

CONCLUSÕES

A necessidade de um pavimento mais durável, econômico e de caráter mais ecológico deu origem à técnica de pavimentação perpétua, que com o uso de três camadas asfálticas consegue atingir uma vida útil do pavimento de pelo menos 35 anos. Baseado na ótica de dosagem das camadas de sub-base dos pavimentos perpétuos, a alta resistência à fadiga é adquirida devido à sua granulometria densa e maior teor de asfalto. Com isso, é possível reduzir os danos por trincas de fadiga na estrutura do pavimento, que é um dos maiores problemas enfrentado nos processos de dimensionamento.

Quanto aos ensaios mecânicos realizados, pôde-se inferir que o módulo de resiliência obtido para as misturas projetadas para terem ganhos na resistência à fadiga sugerem um material mais flexível que misturas asfálticas com CAP 50/70 aplicadas no Brasil (POSSEBON 2018), contudo um pouco mais rígidas que o BINDER estudado aqui como mistura “CONTROLE”.

As misturas aqui chamadas de CAARF foram obtidas com o uso de uma curva granulométrica próxima à de densidade máxima, o que refletiu em alto consumo de CAP já para 4% de Vv, além de desempenho à fadiga superior à mistura CONTROLE, refletindo em ganho qualitativo de resistência à fadiga. Ganhos quantitativos não foram analisados, pois dependem de mais fatores que os analisados nessa pesquisa, tais como: tipo de CAP, uso de polímeros, tipos de agregados etc.

Foi possível verificar que a mistura CAARF01 dosada para Vv de 4%, porém para granulometria próxima à de máxima densidade, atingiu o melhor desempenho à fadiga, superando misturas com o maior consumo de CAP. Há grande possibilidade do aumento do consumo de CAP, proporcionado pelos demais métodos avaliados para misturas de alta resistência à fadiga, ter acarretado em pontos de fragilidade e na perda de desempenho às misturas CAARF02 e CAARF03, quando comparadas à mistura CAARF01, contrariamente às recomendações encontradas nas referências consultadas nesse trabalho. Com isso, o aumento no consumo de CAP reduziu tanto a resistência à tração quanto a resistência à fadiga das misturas (CAARF02 e CAARF03), possivelmente pela lubrificação excessiva dos agregados, visto que o teor de ligante de 4% de Vv (CAARF01) já era relativamente alto (5,17%). Comparando às três misturas CAARF e a CONTROLE, a escolha da que forneceu consumo intermediário de CAP constituiu-se numa vantagem, pois fornece benefícios técnicos sobre as demais, mas com custo não tão elevado.

REFERÊNCIAS

ANAND, Sanchit; GRAUR, Arun; SINGH, Gagandeep. Chinese Society of Pavement Engineering. Evaluation of fatigue endurance limit of dense bituminous mix using diferente failure theories for the design of perpetual pavement. Springer, 2020. Disponível em: www.springer.com/42947.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS: Guide for Design of pavement structures. Washington, D.C. 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15184: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2021.



[DOI: 10.29327/1430212.49-33](https://doi.org/10.29327/1430212.49-33)

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE UM MISTURA ASFÁLTICA COM ALTA RESISTÊNCIA A FADIGA**

BERNUCCI, Liedi B., MOTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2ª edição. Rio de Janeiro, PETROBRAS: ABEDA, 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE: SEST SENAT. Pesquisa CNT de Rodovias 2022. Brasília, 2022. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br>.

CHRISTENSEN, Don; BONAQUIST, Ray. TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR E-C124. Practical approaches to hot-mix asphalt mix design and production quality control testing. Whashington, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER 004: Material betuminoso – Determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método de película delgada. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT 136: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Brasília, 2018.

DNIT 135: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Brasília, 2018.

DNIT 183: Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Brasília, 2018.

GRILLO, Alexandre Henrique Hahn Franco. Dimensionamento de um pavimento utilizando a técnica de pavimentação perpétua para um trecho da rodovia BR-282/SC. Florianópolis, 2015.

HUANG, Y.H. Pavement analysis and design. USA: Pearson Prentice Hall, 2004.

KUMAR, S. G.; SATYA, J.; MITTAL, K.; and RAJU, S. Design of a bituminous mixture for perpetual pavement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. DOI 10.1088/1757-899X/330/1/012132

MEDINA, J., e Motta, L M. G. Mecânica dos Pavimentos. 2ª edição. Editora Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

NEJAD, F. Moghadas; AFLAKI, E.; MOHAMMADI, M. A. Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures. Elsevier, 2010.

NEWCOMB, David E.; BUNCHER, Mark; HUDDLESTON, Ira J. Concepts of perpetual pavements. Transportation Research Circular, 2001.

NEWCOMB, David E.; WILLIS, Richard; TIMM, David H. Perpetual asphalt pavements: A synthesis. 2010.

POSSEBON, Évelyn Paniz. Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

TRANSPORT RESEARCH LABORATORY. Design of long-life flexible pavements for heavy traffic. Berkshire, 1997.

TAREFDER, Rafiqul A.; BATEMAN, Damien. NEW MEXICO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. NM08NSC-01: Future design of perpetual pavements for New Mexico. Albuquerque, 2009.



APLICAÇÃO DO ENSAIO IDEAL-CT PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Andher Paulo Capanema Santana¹ & Rodrigo Pires Leandro²

RESUMO

O trincamento por fadiga é um dos defeitos mais comuns em pavimentos asfálticos de comportamento flexível e torna-se ainda mais relevante com o aumento do volume de veículos. Além disso, a avaliação desse tipo de fenômeno, em laboratório, exige a realização de ensaios em equipamentos sofisticados e de elevado custo, dificultando o acesso a esse tipo de investigação em obras de menor nível de tráfego e em regiões isoladas. Nesse cenário, surge o ensaio *Ideal Cracking Test* (IDEAL-CT) como uma alternativa simples, rápida, eficiente e de baixo custo. Com o surgimento de uma nova opção para avaliação do comportamento de misturas asfálticas à fadiga, é necessária a sua validação para a possível implementação no contexto brasileiro. Desse modo, este artigo apresenta os resultados da primeira fase de um trabalho mais amplo de validação, caracterizado pelas seguintes etapas experimentais: i. Dosagem das misturas e ensaios de IDEAL-CT; ii. Realização dos ensaios de fadiga diametral; iii. Realização dos ensaios de fadiga em vigotas e; iv. Avaliação do trincamento por fadiga em campo. O objetivo da primeira etapa, apresentada nesse trabalho, foi a dosagem das misturas asfálticas e análise dos resultados de IDEAL-CT em função do tipo e do teor de asfalto. Nesse artigo, são apresentados os resultados da primeira etapa. A utilização do ensaio IDEAL-CT mostrou-se promissora para a categorização de misturas quanto ao seu potencial de trincamento. Mesmo com uma variação alta, as tendências esperadas em relação ao teor e ao tipo de ligante confirmaram-se. A sensibilidade dos resultados à composição da mistura, aliada à simplicidade, praticidade, eficiência e baixo custo dos equipamentos utilizados, sugerem o IDEAL-CT como um teste promissor para categorização da resistência ao trincamento de misturas asfálticas densas.

PALAVRAS-CHAVE: IDEAL-CT; Fadiga; Mistura Asfáltica.

ABSTRACT

The fatigue cracking is one of the most common defects in flexible pavements and becomes more relevant with the increase in traffic volume. Moreover, evaluating fatigue in the laboratory requires sophisticated devices with high costs, which makes access to this investigation difficult in pavement construction for low-traffic volume roads and in isolated areas. In this scenario, the Ideal Cracking Test (IDEAL-CT) could be a simple, fast, efficient, and low-cost alternative. With the emergence of a new option to evaluate the behavior of asphalt mixtures to fatigue, validation of this option is necessary for possible implementation in the Brazilian context. Therefore, this paper presents the results of the first step of a more comprehensive study, which is characterized by: i. Hot mix asphalt design and IDEAL-CT tests; ii. Fatigue tests on diametral specimens; iii. Fatigue tests on beams and; iv. Field evaluation of fatigue cracking. The main objective of the first step was to design hot mix asphalt and evaluate IDEAL-CT results based on binder content and type. The results of the first step of the work are presented in this paper. The use of the IDEAL-CT test proved promising for categorizing mixtures based on their cracking potential. Despite a high variation, the expected trends regarding binder content and type were confirmed. The sensitivity of the results to the mixture composition, combined with the simplicity, practicality, efficiency, and low cost of the equipment used, indicates IDEAL-CT as a promising test for categorizing the resistance to cracking of hot mix asphalt.

KEY WORDS: IDEAL-CT; Fatigue; Hot Mix Asphalt.

¹ Universidade Federal de Uberlândia, andherpaulo@gmail.com; rodrigo.leandro@ufu.br.



DOI: [10.29327/1430212.49-19](https://doi.org/10.29327/1430212.49-19)

APLICAÇÃO DO ENSAIO IDEAL-CT PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

INTRODUÇÃO

O desempenho de um concreto asfáltico depende de diversas características relacionadas à sua condição, incluindo o tipo e a proporção dos materiais utilizados, o nível e o método de compactação, o processo construtivo, o tráfego e o clima. Nas últimas décadas, o Brasil tem apresentado um aumento recorrente no volume de tráfego de caminhões, bem como no peso por eixo, o que tem dificultado o alcance de um desempenho satisfatório para os pavimentos construídos com materiais convencionais.

Assim, os Asfaltos Modificados por Polímeros (AMP) surgiram como uma alternativa técnica para melhorar o desempenho dos pavimentos em situações de tráfego pesado e condições adversas de clima. Um dos tipos de polímeros usualmente adicionados ao ligante asfáltico é o estireno-butadieno-estireno (SBS). Este composto, adicionado por modificação química de outro polímero, possui um comportamento elastomérico termoplástico, ou seja, é elástico em baixas temperaturas e termoplástico à medida que a temperatura aumenta. (MANO, 1985; LEITE, 1999).

Independentemente do tipo de ligante utilizado, um dos principais efeitos da aplicação de cargas dinâmicas, associada às condições climáticas, nos revestimentos asfálticos de pavimentos flexíveis, é o surgimento de trincas por fadiga. A formação desse tipo de trinca permite a entrada de água na estrutura, desestabilizando as camadas subjacentes, o que resulta na redução da rigidez do sistema e no aumento do nível de deflexão, diminuindo a vida útil da estrutura. Nesse contexto, também deve-se considerar a influência das características e proporções dos materiais constituintes das misturas asfálticas, tornando necessário que o projeto dessas misturas inclua a avaliação do comportamento quanto à fadiga em laboratório.

Os ensaios de fadiga podem ser realizados sob diferentes condições de carregamento, temperatura, dimensões de corpos de prova (CPs) e à tensão ou deformação controlada. Os ensaios caracterizam-se pela aplicação de uma carga repetida que leva ao aumento das deformações de tração até o rompimento da amostra. Normalmente, os ensaios exigem a utilização de equipamentos sofisticados e de CPs que precisam ter suas dimensões ajustadas para o padrão de ensaio escolhido (CPs em forma de vigotas ou trapezoidal). O ensaio mais simples é o de fadiga por compressão diametral por tensão controlada, que gera um estado biaxial de tensão em um CP cilíndrico. Um dos problemas relacionado a este tipo de ensaio é a combinação dos efeitos de compressão e de tração no centro do CP (LEANDRO, 2016).

As complexidades envolvidas nos ensaios de fadiga dificultam a investigação de qualquer parâmetro relacionado a esse tipo de efeito em projetos de pavimentos com menor volume de tráfego ou em regiões distantes dos centros urbanos. Portanto, a proposição de ensaios simples, rápidos e de baixo custo pode facilitar a avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas e o controle de obra, especialmente em cenários de baixo a médio volume de tráfego e em regiões técnica e economicamente menos desenvolvidas. Nesse sentido, Zhou (2016) estabeleceu sete requisitos desejados para um ensaio de laboratório simples de avaliação de trincamento por fadiga:

- a. Simplicidade: desnecessidade de corte, colagem, perfuração ou entalhamento de CPs;
- b. Praticidade: mínimo de treinamento necessário para realizar o ensaio;
- c. Eficiência: realização do teste em um minuto;
- d. Equipamento: custo abaixo de 10 mil dólares;



- e. Repetitividade: coeficiente de variação menor que 25 %;
- f. Sensibilidade: sensibilidade à composição do concreto asfáltico (agregado, ligante e outros);
- g. Correlação com o comportamento em campo.

Assim, em 2019, Zhou propôs o *Ideal Cracking Test* (IDEAL-CT) que integra os sete requisitos supracitados. O ensaio foi normatizado pela norma ASTM D8225 (ASTM, 2019b) e é realizado com CPs cilíndricos convencionais à temperatura de 25° C. Utiliza-se uma prensa que aplica duas forças de compressão diametralmente opostas, causando tensões de tração ao longo do diâmetro perpendicular. A velocidade de execução do ensaio é de 50 milímetros por minuto.

No Brasil, Raffler (2023) estudou o comportamento à fadiga de misturas asfálticas fabricadas com diferentes ligantes asfálticos. Os ensaios utilizados foram de carga repetida em amostras diamétricas e também por meio do IDEAL-CT. Os resultados do índice de resistência ao trincamento (CT_{Index}) variaram de 75 a 187 para misturas elaboradas com ligantes modificados e convencionais, apresentando relação com os resultados de fadiga diametral. A mesma tendência de comportamento foi observada nos trabalhos de Zhou (2019), Zhou et al. (2020) e Bennert et al. (2023).

De acordo com Zhou et al. (2019), misturas asfálticas com maiores valores de CT_{Index} apresentam melhor desempenho à fadiga. Contudo, no estudo de Raffler (2023), nota-se que as misturas elaboradas com ligantes modificados por polímeros (AMP 65/90E) e altamente modificados por polímeros (HiMA AMP 65-90E) apresentaram resultados de CT_{Index} menores do que os de ligantes convencionais. Por outro lado, nos ensaios de fadiga por compressão diametral, percebeu-se que as misturas elaboradas com ligantes modificados foram as que mostraram maior vida de fadiga.

Segundo Raffler (2023), a discrepância entre as tendências verificadas nesses ensaios deve-se, provavelmente, ao nível de tensão aplicado nos CPs. No ensaio de fadiga diametral por carga repetida, o nível de tensão atinge um pico máximo de 40% da resistência à tração por compressão diametral estática, sendo um ensaio relacionado ao início e à propagação de trincas nas amostras em tensões menores que a máxima de ruptura. Por outro lado, o IDEAL-CT está relacionado à capacidade dos CPs de resistir à propagação de trincas, ou seja, a análise ocorre após o rompimento inicial da amostra. Portanto, tratam-se de ensaios de concepções distintas que devem ser observadas no momento da análise e interpretação dos resultados.

Os trabalhos de Seittlari et al. (2020), Yan et al. (2020) e Chowdhury et al. (2022) mostraram que os resultados de IDEAL-CT podem ser relacionados ao desempenho à fadiga, apesar de não ser conceitualmente um ensaio de fadiga, uma vez que não há aplicação de cargas repetidas. Nesse sentido, 14 departamentos de transporte americanos utilizam esse tipo de ensaio como uma ferramenta para a avaliação do potencial de trincamento das misturas (TTE, 2021).

Por ser um ensaio proposto recentemente, principalmente no Brasil, ainda são necessárias avaliações sob diferentes condições de campo para a validação dos ensaios a longo prazo. Se mostrando viável, o teste em questão será útil na comparação de misturas asfálticas de diferentes tipos quanto à tolerância ao trincamento por fadiga, de forma simples e com custo baixo. O objetivo principal desse trabalho foi avaliar o comportamento de diferentes misturas asfálticas densas sob a luz dos ensaios de IDEAL-CT em função do teor e do tipo de asfalto. Esse trabalho é parte de um projeto mais amplo, constituindo a sua primeira etapa. Nas demais etapas, serão avaliados os resultados de IDEAL-CT com outros ensaios de laboratório e com o monitoramento de pista experimental.



DOI: 10.29327/1430212.49-19

APLICAÇÃO DO ENSAIO IDEAL-CT PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA
À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

MATERIAIS E MÉTODO EXPERIMENTAL

Neste item, serão descritos os materiais utilizados na produção dos CPs utilizados nesta pesquisa. Também serão especificados os métodos e ensaios necessários para atingir o objetivo proposto.

Materiais utilizados

Os agregados utilizados para a produção das misturas asfálticas foram pó de pedra, brita 0 e 1, oriundas de rocha basáltica, provenientes da cidade de Uberlândia - MG. Esse tipo de agregado foi escolhido por ser o mais comumente utilizado em misturas na região. A caracterização dos agregados foi realizada por Santos (2019) e está indicada na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização dos agregados utilizados.

Ensaio	Resultado do Ensaio	Valores de referência	Norma
Abrasão <i>Los Angeles</i>	12,5%	< 50%	ABNT NBR NM 51
Índice de forma	2	≤ 2	ABNT NBR 7809
Equivalente de areia	83%	> 35%	ABNT NBR 12052
Durabilidade	26%	≤ 30%	ASTM C88

Para a fabricação das misturas asfálticas foram utilizados dois tipos de ligantes, um convencional 50/70 proveniente da Refinaria Landulpho Alves – RLAM (São Francisco do Conde - BA), e outro modificado por polímero elastomérico (SBS). As Tabelas 2 e 3 apresentam as especificações técnicas do ligante puro (CAP 50/70) e do ligante modificado por polímero (AMP 65/90), respectivamente.

Tabela 2: Caracterização física do CAP 50/70.

Característica	Método	Resultado
Penetração	D 5	53
Ponto de amolecimento - °C	D 36	53
Viscosidade Brookfield, a 135°C - cP	D 4402	434
Viscosidade Brookfield, a 150°C - cP	D 4402	222
Viscosidade Brookfield, a 177°C - cP	D 4402	96
Ductibilidade a 25°C - cm	D 113	84
Ponto de fulgor - °C	D 92	350
Densidade relativa a 20°C	D 70	0,997

Tabela 3: Caracterização física do AMP 65/90.

Característica	Método	Resultado
Penetração a 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR 6576	45
Ponto de amolecimento - °C	NBR 6560	81,5
Viscosidade Brookfield, a 135°C - cP	NBR 15184	1883
Viscosidade Brookfield, a 155°C - cP	NBR 15184	566
Viscosidade Brookfield, a 175°C - cP	NBR 15184	220
Ductibilidade a 25°C - cm	NBR 15086	93,3
Ponto de fulgor - °C	NBR 11341	338
Densidade relativa a 25°C	NBR 6296	1,006



Preparo das amostras

Para a definição do teor de asfalto, utilizou-se o método de dosagem Marshall. Optou-se pela utilização de uma distribuição granulométrica densa fina com tamanho máximo nominal (TMN) de 19mm por ser essa a mistura que será utilizada na construção do trecho experimental. A distribuição granulométrica escolhida está apresentada na Figura 1 e está dentro da Faixa C do DNIT (2006).

Considerando que o objetivo deste trabalho é investigar a sensibilidade do ensaio de IDEAL-CT em relação ao tipo e teor de ligante, foram utilizados dois CAPs (cimento asfáltico de petróleo) de origens distintas: asfalto puro de alta penetração (CAP 50/70) e asfalto modificado por SBS (AMP 65/90). Para a confecção dos CPs, realizou-se o fracionamento dos agregados peneira por peneira, assegurando controle na proporção de cada fração em cada uma das amostras moldadas.

Os teores de ligante de teste utilizados na dosagem variaram de 0,5% dentro da faixa de 4 a 6%, totalizando cinco teores diferentes. Para cada teor, foram moldados 3 CPs, utilizando compactador fixo mecânico com base plana, seguindo as orientações da ASTM (2016b). Foram aplicados 75 golpes por face dos CPs. As temperaturas de usinagem e compactação foram obtidas a partir da caracterização da Viscosidade Brookfield dos ligantes (ASTM, 2016a). Na Tabela 4 são apresentadas as temperaturas de trabalho para os dois tipos de asfalto.

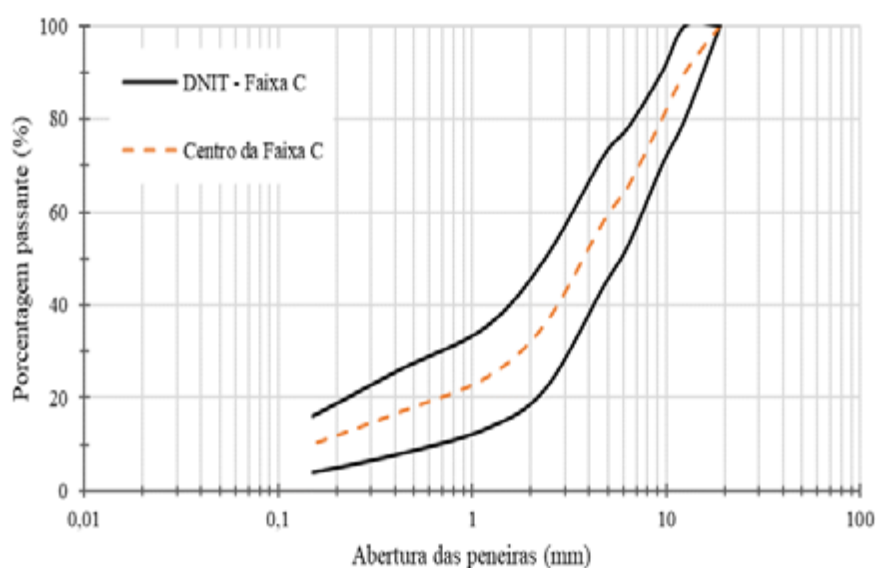


Figura 1: Distribuição granulométrica utilizada e da Faixa C do DNIT (2006).

Tabela 4: Temperaturas de trabalho do CAP e AMP

Temperaturas de Trabalho	CAP 50/70	AMP 65/90
Temperatura de Usinagem (°C)	160	180
Temperatura dos Agregados (°C)	170	190
Temperatura de Compactação (°C)	145	170



DOI: 10.29327/1430212.49-19

APLICAÇÃO DO ENSAIO IDEAL-CT PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

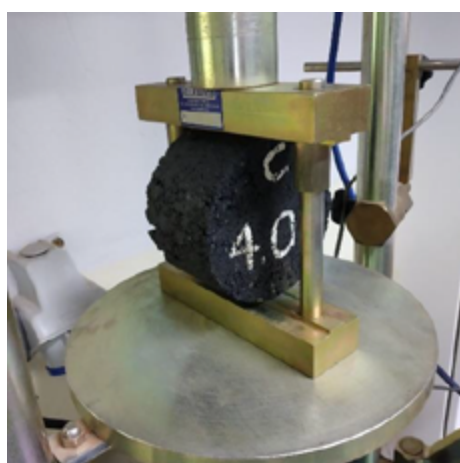
A massa específica aparente dos CPs (G_{mb}) foi determinada segundo as recomendações da ASTM (2019b) e a densidade máxima medida (G_{mm}) foi obtida seguindo os procedimentos da ASTM (2019a). Com o intuito de determinar a densidade aparente (*oven-dry*) da mistura dos agregados ($G_{sb,od}$), foram feitos ensaios conforme determinam a ASTM (2015a) e ASTM (2015b). As frações de agregado graúdo foram ensaiadas separadamente, enquanto as frações miúdas compuseram uma mistura proporcional à utilizada na dosagem. Para o material passante na peneira n.º 200, foi considerada a mesma densidade aparente que a porção miúda, em concordância com a ASTM (2015b). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Densidade aparente (*oven-dry*) e absorção dos agregados.

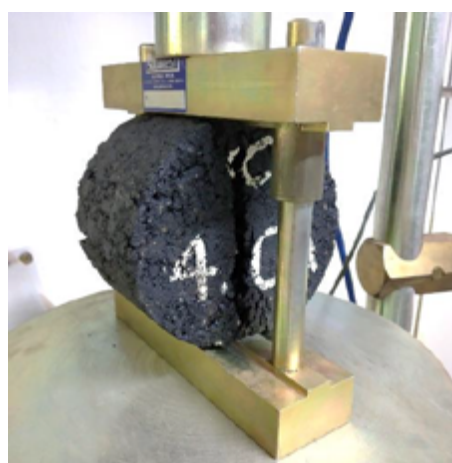
Peneira N°	% Retida / Peneira	Gsb,od	Absorção %
1/2"	10,00	2,846	1,3
3/8"	10,00	2,842	1,3
1/4"	14,82	2,817	1,3
N° 4	7,18	2,804	1,3
N° 8 - N° 200	52,00	2,846	1,2
Fundo	6,00	2,846	1,2
Mistura de agregados		2,838	1,2

Ensaio de IDEAL-CT

Os ensaios realizados de IDEAL-CT seguiram as recomendações de Zhou (2019), com exceção de que foram utilizados CPs de 101,64 milímetros de diâmetro em média, diferente da indicação de 150 milímetros. Na realização do experimento, foram usadas as 30 amostras moldadas durante as dosagens Marshall. Na Figura 2 é mostrado um exemplo de realização dos ensaios de IDEAL-CT de um CP Marshall à temperatura de 25 °C. Para que fossem calculados os CTIndex, foram produzidos gráficos de força aplicada por deslocamento de cada amostra testada, conforme apresentado na Figura 3.



(a)



(b)

Figura 2: Configuração do CP antes (a) e após (b) o ensaio.

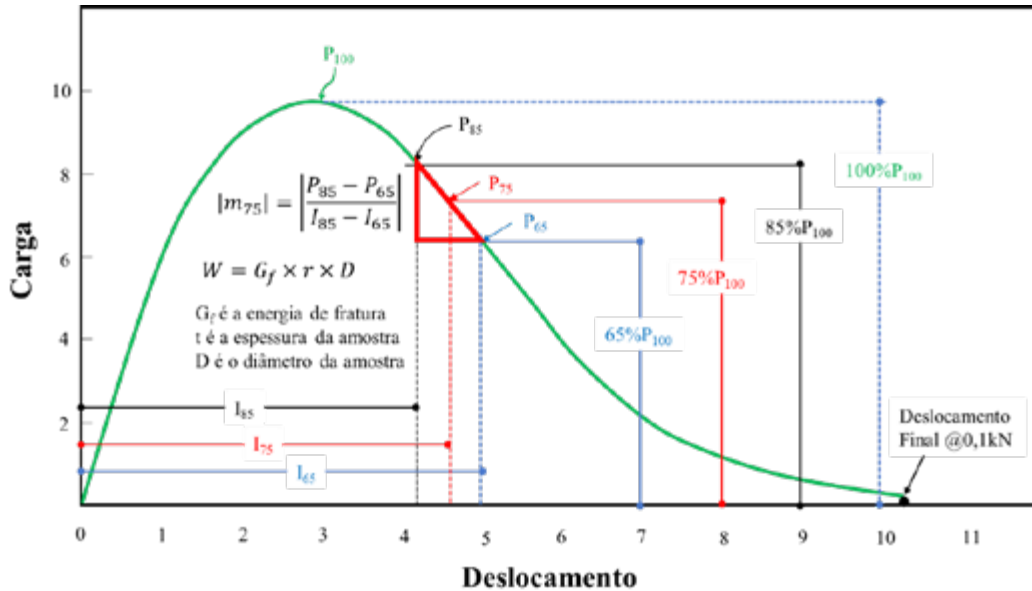


Figura 3: Deslocamento por carga aplicada no ensaio de fadiga (adaptado de ZHOU, 2019).

Com o arranjo dos pontos de dispersão, foi selecionada a parte do gráfico carga-deslocamento referente à região que se inicia após o pico de carregamento, quando a carga aplicada no CP atinge 85% da máxima e termina com o alcance de 65% da carga de pico. Com os valores de carga e deslocamento destes pontos, foi possível determinar a tangente da curva em P_{75} ($|m_{75}|$) (Equação 1).

$$|m_{75}| = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right| \quad (1)$$

em que $|m_{75}|$: tangente da curva em que a carga atinge 75 % do pico [N/mm];
 P_{85}, P_{65} : 85 e 65% da carga de pico, respectivamente [N]; e
 l_{85}, l_{65} : deslocamento correspondente às cargas de 85 e 65 % da carga de pico, respectivamente [mm].

Calculou-se, também, o trabalho até a falha de cada CP (W_f), definido como a área abaixo da curva carga-deslocamento. Disposto deste valor, da espessura e do diâmetro da amostra, foi possível calcular a energia de falha (G_f) por meio da Equação 2.

$$G_f = \frac{W_f}{D \times t} \times 10^6 \quad (2)$$

em que G_f : energia de falha [J/m²];
 W_f : trabalho até a ruptura [J];
 D : diâmetro do CP [mm]; e
 t : espessura do CP [mm].



DOI: 10.29327/1430212.49-19

APLICAÇÃO DO ENSAIO IDEAL-CT PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

O índice de resistência ao trincamento por fadiga (CT_{index}) de cada um dos CPs foi calculado por meio da Equação 3. O valor 10^6 tem função de correção de unidades, enquanto $t/62$ é um fator de correção para a espessura da amostra.

$$CT_{index} = \frac{t}{62} \times \frac{l_{75}}{D} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times 10^6 \quad (3)$$

em que CT_{index} : índice de resistência ao trincamento por fadiga.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Inicialmente, os resultados das dosagens das misturas asfálticas são apresentados, seguidos pelos resultados dos ensaios de IDEAL-CT. Na Tabela 6, estão apresentados os resultados dos parâmetros volumétricos das misturas elaboradas com os dois tipos de asfalto.

Tabela 6: Parâmetros volumétricos da dosagem com CAP 50/70 e AMP 65/90

TEOR %	CAP 50/70					AMP 65/90				
	Vv %	VAM %	RBV %	G _{mb}	G _{mm}	Vv %	VAM %	RBV %	G _{mb}	G _{mm}
4,0	8,94	17,98	50,27	2,425	2,663	8,60	17,72	51,46	2,433	2,662
4,5	6,58	16,80	60,83	2,473	2,674	6,32	17,39	63,68	2,455	2,621
5,0	4,98	16,62	70,05	2,491	2,622	4,25	16,75	74,60	2,487	2,598
5,5	3,61	16,87	78,63	2,497	2,590	2,30	16,63	86,16	2,504	2,563
6,0	3,29	17,46	81,17	2,492	2,577	1,47	17,08	91,40	2,503	2,541

Vv é o volume de vazios; VAM é o volume de vazios no agregado mineral; RBV é a Relação betume-vazios; G_{mb} é a densidade aparente; G_{mm} é a densidade máxima medida.

Considerando que foram utilizados os mesmos agregados e a mesma distribuição granulométrica, juntamente com o controle das frações realizado peneira a peneira, os parâmetros volumétricos para ambas as dosagens mostraram resultados semelhantes. Isto levou a um teor de asfalto de projeto de 5,3% para a mistura com CAP convencional e 5,0% para a mistura com asfalto modificado. Levando em conta a tolerância máxima de $\pm 0,3\%$ no teor de ligante na produção de misturas asfálticas, não houve diferença significativa no teor de projeto. A partir dos CPs das dosagens, foi possível avaliar a sensibilidade do ensaio de IDEAL-CT em relação ao tipo e ao teor de asfalto. Na Figura 4 são apresentados os valores de CT_{index} de acordo com o tipo e a quantidade de asfalto e nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os resultados de CT_{index} e da energia de fratura por amostra para as misturas com CAP convencional e modificado, respectivamente.



RODRIGO LEANDRO,
ANDHER PAULO CAPANEMA SANTANA

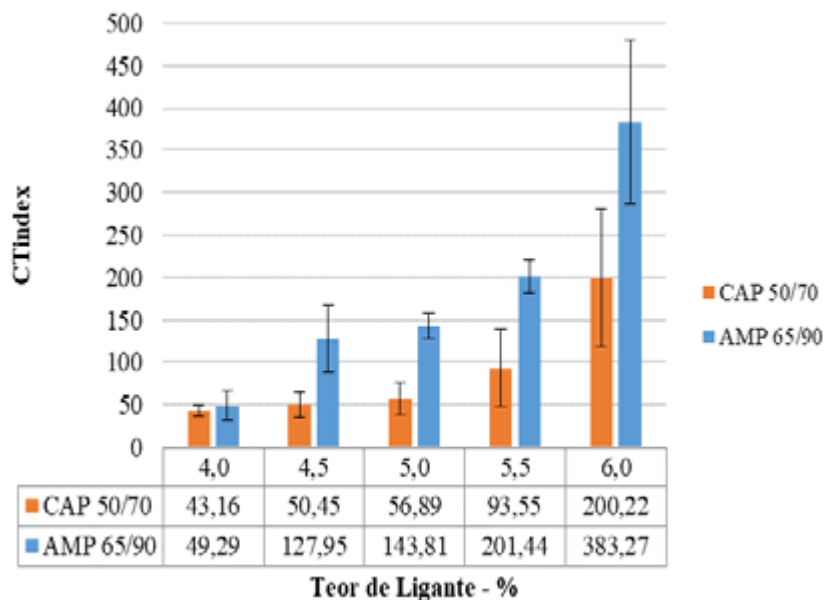


Figura 4: CT_{Index} médio de cada teor por tipo de ligante.

Tabela 7: Resultados de CT_{Index} e da energia de fratura (G_f) para misturas com CAP convencional.

Ligante	CP	t (mm)	l75 (mm)	D (mm)	Wf (J)	G_f (J/m ²)	m75	CT_{index}	$CT_{index,médio}$	Desvio Padrão	CV %
CAP 50/70	4,0% - A	63,72	3,36	101,75	41,55	6.409,10	6,24E+06	34,91			
	4,0% - B	64,02	3,74	101,74	45,98	7.059,23	5,17E+06	51,74	43,16	6,87	15,93
	4,0% - C	64,08	3,16	101,76	39,72	6.091,51	4,56E+06	42,82			
	4,5% - A	64,09	3,41	101,73	50,53	7.749,35	5,30E+06	50,64			
	4,5% - B	63,04	3,56	101,70	64,11	10.000,57	5,19E+06	68,71	50,45	14,99	29,70
	4,5% - C	62,58	2,86	101,70	50,12	7.876,25	6,99E+06	32,01			
	5,0% - A	62,86	4,49	101,81	60,63	9.473,17	5,17E+06	81,92			
	5,0% - B	62,36	4,18	101,72	61,05	9.624,96	7,62E+06	52,23	56,89	18,82	33,07
	5,0% - C	62,89	3,57	101,65	59,37	9.287,30	9,05E+06	36,54			
	5,5% - A	61,53	3,32	101,69	57,88	9.250,07	1,00E+07	29,85			
	5,5% - B	63,10	4,53	101,71	61,32	9.554,83	3,70E+06	116,95	93,55	45,57	48,71
	5,5% - C	63,28	5,12	101,65	60,86	9.462,08	3,63E+06	133,84			
	6,0% - A	64,49	5,82	101,67	72,78	11.099,79	2,11E+06	313,43			
	6,0% - B	64,07	4,61	101,60	67,80	10.415,14	3,10E+06	157,35	200,22	80,83	40,37
	6,0% - C	64,07	4,16	101,60	60,74	9.331,11	3,04E+06	129,87			



DOI: 10.29327/1430212.49-19

APLICAÇÃO DO ENSAIO IDEAL-CT PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA
À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Tabela 8: Resultados de CT_{Index} e da energia de fratura (G_f) para misturas com CAP modificado.

Ligante	CP	t (mm)	175 (mm)	D (mm)	Wf (J)	G_f (J/m ²)	m75	CT_{index}	$CT_{index,médio}$	Desvio Padrão	CV %
AMP 65/90	4,0% - A	62,26	4,15	101,58	46,40	7.336,76	4,21E+06	71,43	49,29	17,06	34,61
	4,0% - B	61,45	4,13	101,62	45,35	7.261,73	6,29E+06	46,53			
	4,0% - C	62,37	3,61	101,58	45,55	7.188,67	8,59E+06	29,92			
	4,5% - A	62,28	4,53	101,75	62,52	9.866,30	2,42E+06	182,57	127,95	38,81	30,34
	4,5% - B	63,30	4,16	101,54	68,30	10.626,50	4,22E+06	105,36			
	4,5% - C	63,73	4,27	101,55	64,33	9.940,92	4,48E+06	95,92			
	5,0% - A	62,08	4,59	101,57	75,12	11.913,43	4,39E+06	122,74	143,81	14,99	10,43
	5,0% - B	63,37	5,44	101,50	67,32	10.467,10	3,67E+06	156,43			
	5,0% - C	63,85	5,66	101,53	74,57	11.503,56	4,34E+06	152,25			
	5,5% - A	64,48	5,11	101,70	72,20	11.009,65	2,53E+06	227,61	201,44	19,38	9,62
	5,5% - B	62,56	5,66	101,61	65,04	10.231,43	2,94E+06	195,42			
	5,5% - C	63,37	4,92	101,60	75,21	11.681,11	3,19E+06	181,29			
	6,0% - A	63,04	5,95	101,58	91,06	14.220,86	1,64E+06	517,48	383,27	96,84	25,27
	6,0% - B	63,97	5,36	101,63	86,40	13.288,42	2,13E+06	339,81			
	6,0% - C	63,97	5,05	101,63	82,34	12.664,86	2,22E+06	292,52			

A análise da Figura 4 e das Tabela 7 e 8 revela uma dispersão considerável nos resultados. As amostras com CAP 50/70 exibiram um coeficiente de variação (CV) máximo de 49%, enquanto as amostras com AMP 65/90 registraram um CV de até 35%. Essa variação pode ser atribuída à dimensão reduzida dos CPs Marshall. Apesar da variabilidade nos resultados, é evidente uma relação direta entre o teor de ligante e o índice de resistência à fadiga. Os CPs moldados com 6% de ligante convencional apresentaram um aumento no CT_{Index} de 364% em comparação com aqueles com 4% de asfalto. Mesmo comportamento foi observado ao usar o CAP modificado, onde um teor de 6% de asfalto resultou em um aumento de 678% no valor de CT_{Index} em relação ao menor teor de ligante. Essa constatação era esperada, uma vez que o aumento na quantidade de asfalto na mistura leva a uma maior resistência à formação de trincas por fadiga. Isso ocorre porque um teor de ligante mais elevado proporciona uma maior elasticidade à mistura asfáltica em detrimento da rigidez dos agregados. Nesse contexto, destaca-se a capacidade do ensaio IDEAL-CT na categorização quanto ao provável comportamento à fadiga em função do teor de asfalto. Quanto a influência do tipo de asfalto, na Tabela 9, são apresentados os resultados da relação entre os valores de CT_{Index} das misturas elaboradas com CAP modificado e convencional.

Tabela 9: Relação do CT_{Index} em função do tipo de ligante por teor de asfalto

TEOR %	CT_{Index} AMP/CAP Puro
4,0	1,14
4,5	2,54
5,0	2,53
5,5	2,15
6,0	1,91
MÉDIA	2,05



Analisando-se a Tabela 9, percebe-se o melhor comportamento das misturas elaboradas com asfalto modificado, principalmente para teores acima de 4% asfalto. O AMP 65/90 apresenta resistência ao trincamento por fadiga, em média, 105% superior ao do CAP 50/70. A Shell (2003) observa que os asfaltos modificados com polímeros elastoméricos resultam no aumento da vida de fadiga, reduzindo o aparecimento de trincas desse tipo. Portanto, o uso do ensaio IDEAL-CT não apenas possibilita a classificação do comportamento à fadiga com base no teor de asfalto, mas também com relação ao tipo de ligante utilizado.

CONCLUSÕES

A principal conclusão deste trabalho é que a utilização do ensaio IDEAL-CT se mostrou promissora para a categorização de misturas asfálticas quanto ao seu potencial de trincamento. Com uma amostra de três CPs, não foi possível fazer uma análise comparativa apropriada, e recomenda-se o uso de mais CPs para permitir uma análise estatística mais elaborada. Mesmo com uma variação alta, decorrente das dimensões das amostras, as tendências esperadas tanto em relação ao teor de ligante, quando ao tipo de ligante utilizado, se confirmaram. A sensibilidade dos resultados à composição da mistura, alinhado à simplicidade, praticidade, eficiência e baixo custo, apontam o IDEAL-CT como um teste promissor para análise da resistência ao trincamento.

A correlação com o comportamento em campo e com outros ensaios sofisticados de fadiga não foram explorados nessa etapa do projeto. Essas investigações constituem as próximas fases do trabalho.

Por fim, a utilização do ensaio IDEAL-CT possibilita a categorização das misturas quanto à resistência ao trincamento com base no teor e tipo de asfalto. Desse modo, vislumbra-se seu potencial para utilização no controle de obras em regiões distantes dos principais centros tecnológicos e em projetos de menor recurso financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2014) *NBR 16273 – Misturas asfálticas – Propriedades volumétricas de concreto asfáltico*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Asphalt Institute (2014) *Asphalt Mix Design Methods*. Manual Series MS-2. 7ª ed., Bagdade.
- ASTM (2015a) *C127 – Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM (2015b) *C128 – Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM (2016a) *D2493/D2493M – Standard Practice for Viscosity-Temperature Chart for Asphalt Binders*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM (2016b) *D6926 – Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM (2019a) *D2041/D2041M – Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM (2019) *D2726/D2726M – Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.



DOI: [10.29327/1430212.49-19](https://doi.org/10.29327/1430212.49-19)

APLICAÇÃO DO ENSAIO IDEAL-CT PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA
À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

- ASTM (2019b) *D8225 – Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- Bennert, T, Garg, N., Ericson, C., Cytowicz, N. (2023) *Evaluation of test methods to identify asphalt binders prone to surface-initiated cracking*. Transportation Research Record, v. 2677, n. 3, p. 897-910, 2023. doi: 10.1177/03611981221119191.
- Chowdhury, P. S., Noojilla, S. L. A., Reddy, M. A. (2022) *Evaluation of fatigue characteristics of asphalt mixtures using cracking tolerance index (CT_{Index})*. Construction and Building Materials, v. 342, 128030, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128030.
- DNIT (2006) *ES 031 – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Leandro, R. P. (2016) *Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação*. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Leite, L. F. M. (1999) *Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros*. Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Mano, E. B. (1985) *Introdução a polímeros*. São Paulo: Editora Edgard Blücher.
- Raffler, A. (2023) *Análise do desempenho à fadiga de ligantes e misturas asfálticas densas em função da origem da modificação por polímero*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba.
- Santos, M. A. Z. (2019) *Análise do efeito da adição de fibra de polipropileno no comportamento mecânico de uma brita graduada tratada com cimento*. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.
- Seitllari, A., Boz, I., Habbouche, J., Diefenderfer, S. D. (2020) *Assessment of cracking performance indices of asphalt mixtures at intermediate temperatures*. International Journal of Pavement Engineering. 23:1, p. 70-79, 2020. DOI: 10.1080/10298436.2020.1730838.
- SHELL (2003) *The Shell bitumen handbook*. 5. Ed. Cambridge.
- Soares, J.B., F. A. Freitas e J. V. Branco (2000). *Método de previsão do teor ótimo de ligante em misturas asfálticas tipo CBUQ*. Anais da 32ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília.
- Texas Transportation Researcher - TTR (2021) *IDEAL-CT — Simple, Reliable, Efficient, Repeatable, Cost Effective*. Texas Transportation Researcher. Volume 57, Number 1.
- Zhou, F., D. Newcomb, C. Gurganus, S. Banihashemrad, E. S. Park, M. Sakhaeifar, and R. L. Lytton. (2016) *NCHRP 9-57: Experimental Design for Field Validation of Laboratory Tests to Assess Cracking Resistance of Asphalt Mixtures*. College Station.
- Zhou, F. (2019) *Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance*. College Station.
- Zhou, F., Hu, S., Newcomb, D. (2020) *Development of a performance-related framework for production quality control with ideal cracking and rutting tests*. Construction and Building Materials. v. 261, 120549, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120549.



COMPARAÇÃO DO PARÂMETRO FATOR DE FADIGA DA MISTURA (FFM) OBTIDO POR DIFERENTES ENSAIOS

Lucas Aragão Lira¹; Arthur Moreira Veras¹; Iuri Sidney Bessa¹; Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos¹; Juceline Batista dos Santos Bastos²; Beatriz Chagas Silva Gouveia³ & Jorge Barbosa Soares¹

RESUMO

O trincamento por fadiga é uma das principais causas de defeitos ao pavimento asfáltico, principalmente em idades mais avançadas de sua vida útil. A resistência à fadiga é estudada por meio de diversos ensaios, nos quais destacam-se o ensaio de Fadiga por Compressão Diametral (CD), normatizado no Brasil (DNIT 183/2018) e responsável pelos coeficientes de regressão (k_1 e k_2) no Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), e o ensaio de Fadiga por Tração-Compressão (T-C) (AASHTO TP107), de maior complexidade e mais representativo do fenômeno estudado. Buscando comparar os resultados de ambos os ensaios e uma correlação entre o seus Fatores de Fadiga da Mistura (FFM), índice de desempenho da mistura quanto a resistência à fadiga, comparou-se o resultado dos dois métodos em quatro misturas, com diferentes tipos de ligantes e agregados de diferentes tamanhos e origens. A representação das curvas de Wöhler mostrou comportamento semelhante em ambos os ensaios quando foi levado em consideração uma mesma temperatura na construção de ambas (25°C). Embora os FFMs obtidos através do ensaio T-C sejam significativamente maiores, obteve-se uma boa correlação dos índices ($R^2 > 0,98$) quando representados por função de potência. Devido ao baixo número de pontos, no entanto, é preciso uma amostragem maior para verificar uma tendência de comportamento.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga por Compressão Diametral, Fadiga por Tração-Compressão, Fator de Fadiga da Mistura.

ABSTRACT

Fatigue cracking is one of the main distresses in asphalt pavements, especially at more advanced ages of its useful life. Fatigue resistance is studied by means of various tests, among which the Diametral Compression Fatigue (CD) test, standardized in Brazil (DNIT 183/2018) and responsible for the regression coefficients (k_1 and k_2) in the Brazilian National Design Method (MeDiNa), and the Tension-Compression Fatigue (T-C) test (AASHTO TP107), of greater complexity and more representative of the studied phenomenon. Seeking to compare the results of both tests and a correlation between their Fatigue Area Factors (FAF), an index of the mixture's performance in terms of fatigue resistance, the results of the two methods were compared in four mixtures, with different types of binders and aggregates of different sizes and origins. The representation of Wöhler curves presented similar behavior in both tests when the same temperature was considered (25°C). Although the FFMs obtained through the T-C test were significantly higher, a good correlation was achieved ($R^2 > 0.98$) when represented by a power function. Due to the low number of data points, however, a larger sample is needed to verify a behavioral trend.

KEY WORDS: Diametral Compression Fatigue Test, Tension-Compression Fatigue Test, Fatigue Area Factor.

¹ Universidade Federal do Ceará, lucaslira@alu.ufc.br; arthurveras@alu.ufc.br; iuri@det.ufc.br; babadopulos@ufc.br; jsoares@det.ufc.br

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, juceline.santos@ifce.edu.br

³ Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, beatriz.gouveia@dnit.gov.br



DOI: [10.29327/1430212.49-45](https://doi.org/10.29327/1430212.49-45)

COMPARAÇÃO DO PARÂMETRO FATOR DE FADIGA DA MISTURA (FFM)
OBTIDO POR DIFERENTES ENSAIOS

INTRODUÇÃO

O trincamento por fadiga em pavimentos asfálticos, uma questão crítica causada pela repetição de cargas de tráfego (ASTM, 1979), propicia a propagação de fissuras que comprometem a integridade estrutural do pavimento e sua resistência aos esforços aplicados, resultando em perda de material e exposição das camadas subjacentes. Esse tipo de trincamento tem alta incidência nas rodovias nacionais, comprometendo tanto as características funcionais quanto as estruturais das rodovias em todo o país. Assim, a previsão da evolução desses trincamentos pode orientar decisões preventivas e otimizar o dimensionamento das camadas do pavimento asfáltico.

O método de dimensionamento lançado pelo DNIT (MeDiNa) introduz diretrizes atualizadas para a pavimentação no Brasil, substituindo o empirismo do método tradicional (SOUZA, 1981) por uma abordagem mais mecanicista. O MeDiNa inclui ensaios de caracterização de rigidez, como o Módulo de Resiliência (DNIT 135/2018-ME), e vida de fadiga, como o ensaio de Compressão Diametral (DNIT 183/2018-ME). Eles são usados para determinar a rigidez e a vida de fadiga dos materiais, respectivamente, mas não levam em conta variáveis viscoelásticas que trazem temperatura e frequência, sabidamente com efeito relevante no processo (PAPER NOSSO NA TRANSPORTES). Apesar dessas limitações, os métodos foram incorporados na proposta de atualização do método de dimensionamento para análises estruturais e previsões de fadiga, representando avanços práticos para a infraestrutura rodoviária nacional (VASCONCELOS, 2020).

Concentrando-se na estimativa do comportamento da mistura asfáltica perante a fadiga para auxiliar a sua dosagem, o Fator de Fadiga da Mistura (FFM) foi escolhido como variável de saída por ser um parâmetro que permite avaliar o comportamento à fadiga e categorizar o desempenho das misturas em um gráfico, em que também se considera a sua rigidez.

Fritzen et al. (2019) desenvolveram uma metodologia para a classificação de misturas asfálticas em quatro categorias com base no desempenho de fadiga. A metodologia requer a determinação da curva de Wöhler, que relaciona o número de ciclos (N) à deformação de tração inicial (ϵ_i). Com base na regressão dessa curva, é possível calcular o FFM, conforme a Equação 1. Posteriormente, são estabelecidas correlações entre o MR e o FFM para identificar em qual categoria a mistura asfáltica se enquadra. A Figura 1 ilustra a regressão aplicada para determinar as classes com um número de repetições padrão de 30% de área trincada. A metodologia apresentada foi incorporada ao *software* MeDiNa.

$$\text{FFM (CD)} = 0,2 \times [\log(N_{100}) + \log(N_{250})] \quad (1)$$

Onde: FFM (CD) é o Fator de Fadiga da Mistura para o ensaio de fadiga por Compressão Diametral (CD); N_{100} é o número de ciclos correspondente à deformação específica de 100 $\mu\epsilon$; N_{250} é o número de ciclos corresponde à deformação específica de 250 $\mu\epsilon$.



Lucas Aragão Lira, Arthur Moreira Veras, Iuri Sidney Bessa,
Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos,
Juceline Batista dos Santos Bastos,
Beatriz Chagas Silva Gouveia & Jorge Barbosa Soares

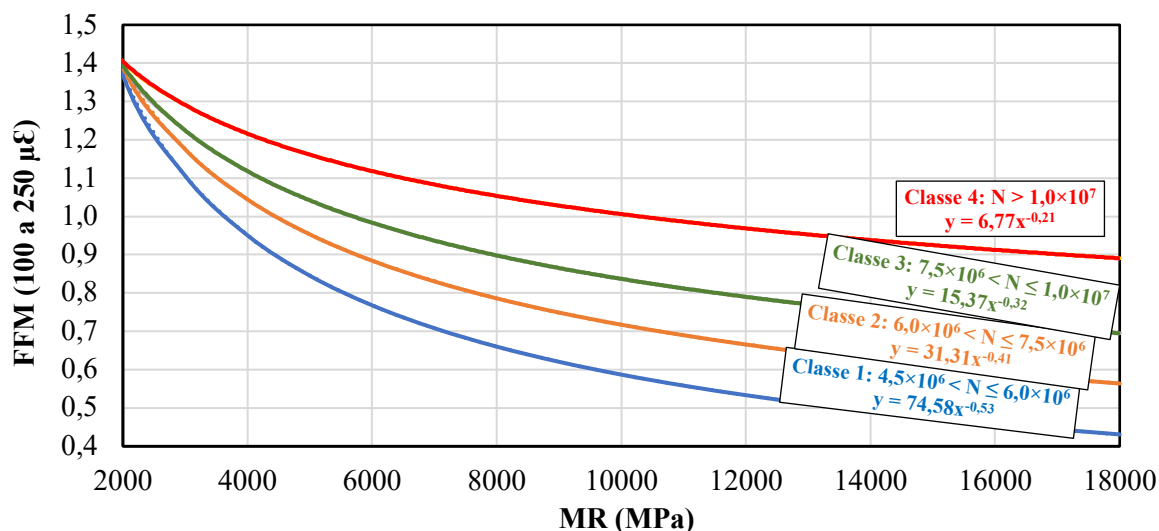


Figura 1. Classificação quanto à fadiga de misturas asfálticas (adaptada de Fritzen *et al.*, 2019)

Diversas abordagens de modelagem, incluindo modelos empíricos de fadiga, modelos de fratura, modelos de dano contínuo viscoelástico ou *viscoelastic continuum damage* (VECD) e modelos simplificados de VECD, como o *simplified viscoelastic continuum damage* (S-VECD) (UNDERWOOD *et al.*, 2006; ROQUE *et al.*, 2010; GUDIPUDI; UNDERWOOD, 2016; SILVA *et al.*, 2024; LUCAS JUNIOR, 2018), têm sido exploradas para prever a fadiga de pavimentos.

A teoria VECD é fundamentada em três conceitos principais: mecânica do dano contínuo, princípio da correspondência elástico-viscoelástico e princípio da superposição tempo-temperatura com crescimento do dano. A mecânica do dano contínuo se baseia na teoria do potencial de trabalho para modelar os efeitos de microfissuras por meio de variáveis de estado internas, permitindo que o material seja considerado como um corpo contínuo e homogêneo. O princípio de correspondência elástico-viscoelástico é baseado no conceito de pseudo-deformação, que permite a redução do comportamento viscoelástico do material ao correspondente comportamento elástico. Já o princípio de superposição tempo-temperatura com crescimento do dano considera os efeitos combinados de tempo/taxa e temperatura, mesmo fora do domínio viscoelástico do comportamento do material (SAFAEI *et al.*, 2016).

O modelo S-VECD caracteriza o desempenho por fadiga de uma mistura asfáltica com base nos resultados de ensaios de fadiga e módulo dinâmico ($|E^*|$). Sua capacidade preditiva, diferencia-o de abordagens convencionais de modelagem de fadiga, em que os parâmetros individuais são definidos empiricamente. Além disso, as propriedades do modelo S-VECD derivadas de ensaios laboratoriais podem ser usadas diretamente como dados de entrada para simulações de desempenho de pavimentos, utilizando programas que permitem prever a área trincada, como CAP3D-D e FlexPAVE (SANTIAGO *et al.*, 2018; ZENG *et al.*, 2023).

Um dos ensaios mais usados para a caracterização da fadiga e aplicação dos modelos é o uniaxial cíclico de tração-compressão (NASCIMENTO, 2014; BABADOPULOS *et al.*, 2015; BOEIRA *et al.*, 2018). Nesse ensaio, há a aplicação de uma carga senoidal de amplitude constante em corpos de



DOI: [10.29327/1430212.49-45](https://doi.org/10.29327/1430212.49-45)

COMPARAÇÃO DO PARÂMETRO FATOR DE FADIGA DA MISTURA (FFM)
OBTIDO POR DIFERENTES ENSAIOS

prova cilíndricos até que a amostra entre em ruptura. Durante o ensaio, são coletados dados de deformação, carga, ângulo de fase e módulo dinâmico. Com este ensaio, diferentes abordagens podem ser aplicadas para a análise da resistência à fadiga, sendo possível obter uma curva característica que relaciona a evolução do dano (S) com a queda de rigidez (C), conforme Equação 2.

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (2)$$

Onde: C_{11} e C_{12} são coeficientes de calibração do modelo.

Para prever o comportamento de fadiga do material, é necessário um critério de falha adequado. Entre os vários critérios desenvolvidos para estimar o desempenho de fadiga de misturas, atualmente, o mais usado é o proposto por Sabouri e Kim (2014), que se baseia na taxa média de liberação da pseudo-deformação (G^R) até o ciclo de falha do ensaio (N_f). Esta relação, apresentada pela Equação 3, é usada para prever, por meio de simulações, o ciclo de falha para uma determinada deformação de tração e, em seguida, a previsão do dano na estrutura.

$$G^R = \gamma N f^\Delta \quad (3)$$

Onde: γ (gama) e Δ (delta) são coeficientes de calibração do modelo.

De acordo com Kim (2009), a amplitude de deformação está associada diretamente à vida de fadiga. Assim, para um dado material, maiores amplitudes de deformação implicam menores vidas de fadiga (LEMAITRE, 1996), assim como identificado em curvas de Wöhler.

Na análise do FFM, a área sob a curva de fadiga ($Nf \times$ deformação) no espaço $\log - \log$ é calculada entre deformações de $100 \mu\epsilon$ e $200 \mu\epsilon$ (Equação 4), intervalos considerados críticos devido à sua ocorrência comum na parte inferior da camada asfáltica em campo. Valores superiores de FFM indicam um desempenho superior em termos de resistência à fadiga da mistura asfáltica. Além disso, é importante considerar a rigidez da mistura para a classificação do seu comportamento. A análise inclui a geração de um gráfico correlacionando a rigidez do material ($|E^*|$) a 20°C e 10 Hz com o FFM da mistura.

$$\text{FFM (T-C)} = \frac{\log(N_f, 200) - \log(N_f, 100)}{2} \times [\log(200) - \log(100)] \quad (4)$$

Onde: FFM (T-C) é o Fator de Fadiga da Mistura para o ensaio de fadiga por Tração-Compressão; N_{100} é o número de ciclos correspondente à deformação específica de $100 \mu\epsilon$; N_{200} é o número de ciclos corresponde à deformação específica de $200 \mu\epsilon$.

De acordo com Rocha *et al.* (2023), dependendo da posição do par $|E^*|$ e FFM no gráfico, a mistura asfáltica é classificada em uma das três classes ilustradas na Figura 2. A distribuição dessas classes na base de dados estudada demonstra um equilíbrio na distribuição das misturas com diferentes comportamentos. As misturas classificadas como classe 3 têm o melhor desempenho, pois apresentam um equilíbrio favorável entre alta resistência à fadiga (elevado FFM) e rigidez que tende a resultar em bom desempenho quanto à deformação permanente. Em contraste, as misturas classe 1



Lucas Aragão Lira, Arthur Moreira Veras, Iuri Sidney Bessa,
Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos,
Juceline Batista dos Santos Bastos,
Beatriz Chagas Silva Gouveia & Jorge Barbosa Soares

apresentam o pior desempenho, com valores baixos de FFM. Observa-se também que a maioria dessas misturas possui menor teor de ligante.

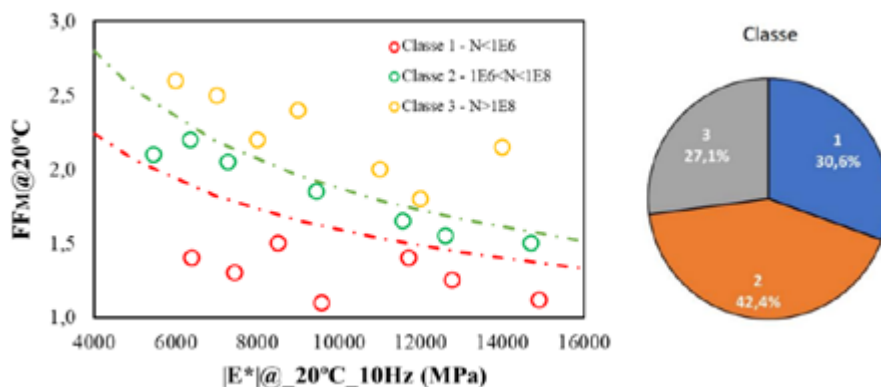


Figura 2. Classificações de misturas segundo $FFM \times |E^*|$ (ROCHA *et al.*, 2023)

Assim, os ensaios de fadiga compressão diametral e tração-compressão têm sido usados para determinar o FFM (FRITZEN *et al.*, 2019; ROCHA *et al.*, 2023) e avaliar a resistência à fadiga das misturas asfálticas. O ensaio CD é bastante conhecido no país, e possui suas origens na caracterização de resistência última à tração de concretos de cimento Portland, pelo Prof. Fernando Lobo Carneiro, sendo usado para caracterização de fadiga em misturas asfálticas desde 1980 (MEDINA e MOTTA, 2015). Apesar de prático, o ensaio não é capaz de incorporar parâmetros viscoelásticos em análises, além de apresentar efeitos de danificação no material não proporcionados apenas por fadiga (mas também por fluência excessiva), premissa fundamental das teorias de evolução do dano mais aceitas (BABADOPULOS *et al.*, 2015). Por outro lado, o ensaio de tração-compressão permite simular as condições mais realistas de carregamento e fornece uma evolução do dano ao longo do tempo. Esses ensaios ($|E^*|$ e T-C) são protocolados pelas normas AASHTO T 342 (2011) e TP 107 (2018), respectivamente. No Brasil, apenas o ensaio de $|E^*|$ é protocolado (DNIT 416/2019-ME, 2019). Embora esses ensaios sejam usados para determinar o FFM, não se sabe se há relação direta entre as classificações obtidas por meio dos dois métodos, já que possuem filosofias diferentes. Isso é importante de se investigar, especialmente porque para o ensaio CD já se dispõe de laboratórios equipados no país. Além disso, se houver uma relação, será possível caracterizar o desempenho por fadiga de misturas asfálticas com base em mecanismos do modelo S-VECD.

Por isso, estabelecer uma relação entre o FFM obtido por ensaios CD e T-C pode contribuir com a avaliação da resistência à fadiga das misturas asfálticas e suas aplicações em modelos como o S-VECD, aprimorando as previsões e análises de desempenho de pavimentos e facilitando um maior controle sobre a malha viária brasileira. Dessa forma, o objetivo deste artigo é comparar os valores de FFM obtidos por diferentes ensaios, especificamente compressão diametral e tração-compressão.

MATERIAIS

Para o presente trabalho, foram utilizadas quatro misturas asfálticas com diferentes tipos de agregados e ligantes, conforme Tabela 1.



DOI: 10.29327/1430212.49-45

COMPARAÇÃO DO PARÂMETRO FATOR DE FADIGA DA MISTURA (FFM)
OBTIDO POR DIFERENTES ENSAIOS

Tabela 1. Características das misturas estudadas

Mistura asfáltica	Parâmetro de dosagem					
	Tipo de CAP	Densidade máxima medida, Gmm	Teor de CAP (%)	Volume de vazios, Vv (%)	Faixa granulométrica (DNIT)	Tamanho máximo nominal, TMN (mm)
1	50/70	2,468	4,0	4,6	A	25,0
2	60/85-E	2,416	6,6	4,6	C	12,5
3	50/70	2,564	4,4	5,1	C	12,5
4	50/70	2,542	4,8	3,9	C	12,5

A Mistura 1 (M1) foi dosada para ser utilizada como um *binder*, camada com menor teor de ligante com agregados maiores em comparação à camada de revestimento superficial. A Mistura 2 (M2) contém ligante modificado por polímero classificado como 60/85-E. A Mistura 3 (M3) possui 15% de agregado siderúrgico, usado como uma alternativa à parte da matriz pétreia virgem e como uma destinação à subprodutos industriais. A Mistura 4 (M4) é uma solução comumente adotada na camada de rolamento, possui agregados de Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 12,5 mm e ligante classificado quanto à penetração como 50/70. As misturas M1, M2 e M4 foram dosadas pelo método Marshall, e a M3 foi dosada pelo método Superpave.

MÉTODOS

Para verificar uma possível correlação entre os valores de FFM obtidos por meio de diferentes ensaios de fadiga, propõe-se o cálculo desse parâmetro a partir de equações tradicionais da literatura, que exigem os ensaios laboratoriais de fadiga. A partir disso, pode-se traçar uma linha de tendência com o tipo de função que apresente melhor aderência entre pontos obtidos, buscando uma melhor relação entre a curva e os pontos experimentais, ou seja, um elevado valor de R².

Módulo Dinâmico (|E*|)

Para entender o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas estudadas, foram realizados ensaios de módulo dinâmico em três amostras padronizadas de cada material. O procedimento seguido é normatizado pela AASHTO T 342-11 (2015). As amostras foram submetidas, em diferentes temperaturas (-10; 4,4; 21,1; 37,8 e 54,4 °C), a carregamentos sinusoidais em várias frequências de carregamento (25; 10; 5; 1; e 0,1 Hz), aplicando carga de maneira que as deformações, monitoradas por três *Linear Variable Diferencial Transducers* (LVDTs), permanecessem na região viscoelástica linear (50-75 µm/m). A construção das curvas mestras das misturas foi possível através do modelo reológico 2S2P1D (2 Molas, 2 Amortecedores parabólicos, 1 Amortecedor Linear) (Olard e Di Benedetto, 2003). A Equação 5 descreve o comportamento do modelo quando submetido a cargas.

$$|E^*|(i\omega\tau) = E_\infty + \left\{ \frac{E_0 - E_\infty}{[1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}]} \right\} \quad (5)$$

Onde: E_∞ = módulo quando frequência tende a zero; E₀ = módulo quando frequência tende a infinito; δ, β = constantes adimensionais; k, h = exponenciais ligados aos amortecedores parabólicos; η = constante relacionada ao amortecedor linear; ω = frequência angular; τ = constante relacionada aos fatores de deslocamento (*shift factors*).



Fadiga por Tração-Compressão (T-C)

A caracterização de resistência a fadiga por meio do ensaio de Tração-Compressão (T-C), usando como base a AASHTO TP 107, foi realizada em amostras moldadas com 17 cm de altura, que posteriormente foram serradas no topo e base para que fossem ensaiadas com 13 cm de altura e com V_v de $4 \pm 0,5\%$. O ensaio foi padronizado para todas as misturas, realizado a 19°C e com aplicação de carga a 10 Hz, e posteriormente modelado por meio da metodologia do S-VECD. Os parâmetros do ensaio (C, S, G^R , Nf e α) foram calculados com o auxílio do software MATLAB, em conjunto com a série de Prony e coeficientes C1 e C2, obtidos através do ensaio de módulo dinâmico por compressão uniaxial. As curvas características de dano das misturas foram obtidas por meio da Equação 2, a partir dos coeficientes C11 e C12, previamente ajustados com a função solver do Excel.

O Fator de Fadiga da Mistura (FFM) de fadiga (T-C) é calculado pela área abaixo da curva de Wöhler, representação gráfica da deformação de cada ciclo *versus* o número de ciclos até a falha (Nf) entre 100 e 200 $\mu\epsilon$, conforme apresentado anteriormente (NASCIMENTO, 2015). Para uma comparação entre os FFM's a partir de diferentes ensaios, optou-se pela construção da curva de Wöhler do ensaio T-C na temperatura de realização do ensaio de fadiga CD (25°C), essa adaptação foi possível pelo uso dos *shifts factors* do ensaio de módulo dinâmico.

Fadiga por Compressão Diametral (CD)

O ensaio de CD é uma derivação do ensaio de Resistência à Tração (RT), no qual a amostra é submetida a cargas equivalentes a proporções fixas do RT de uma mistura, analisando em quantos ciclos a amostra ensaiada é rompida. A curva característica de dano da mistura é feita conforme a Equação (6), a partir dos dados experimentais da mistura. O ensaio foi realizado conforme DNIT-ME 183 (2018), com aplicações de carga de 1 Hz em câmara com temperatura controlada (25°C).

$$N = k_1 \times \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{k_2} \quad (6)$$

Onde: k_1 e k_2 = constantes da mistura; N = número de ciclos até a falha; ϵ_i = deformação de tração inicial.

O FFM (CD), da mesma forma que o FFM (T-C) é obtido através das curvas de Wöhler, relacionando, no entanto, o número de ciclos até a falha (N) com a deformação de tração inicial (E_0). O FFM (CD) foi calculado conforme Equação 1, buscando obter a área embaixo da curva correspondente à faixa de valores entre 100 e 250 $\mu\epsilon$ de deformação resiliente

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Módulo Dinâmico ($|E^*|$)

Os resultados experimentais foram analisados para se encaixar no modelo 2S2P1D, buscando um ajuste das constantes do modelo de modo que os dados experimentais tenham aderência em relação aos dados modelados. As constantes usadas na modelagem das misturas e as constantes C1 e C2 de translação para outras temperaturas (*shift factors*) de William, Landel e Ferry (WFL) estão apresentadas na Tabela 2.



DOI: 10.29327/1430212.49-45

COMPARAÇÃO DO PARÂMETRO FATOR DE FADIGA DA MISTURA (FFM)
OBTIDO POR DIFERENTES ENSAIOS

Tabela 2. Coeficientes de calibração do modelo de módulo dinâmico

Misturas	Constantes de calibração de $ E^* $							Valores de <i>shift factor</i> (WFL)	
	E00 (MPa)	E0 (MPa)	k	h	Δ	tE (s)	β	C1	C2
1	87	35.500	0,25	0,62	2,70	0,090	60	19,76	150,86
2	105	28.000	0,26	0,55	2,95	0,045	60	17,86	141,29
3	75	38.500	0,24	0,57	2,00	0,035	63	18,31	117,01
4	45	31.000	0,26	0,58	2,80	0,100	30	14,87	140,57

A representação da curva mestra é feita, em escala log-log, com o resultado dos módulos e a frequência reduzida, medida que junta os efeitos da frequência de aplicação de carga e a temperatura de ensaio através do princípio de superposição tempo-temperatura (TTSP) (NGUYEN *et al.*, 2009). As curvas mestras das misturas e os dados experimentais estão representados na Figura 3. Os resultados indicam uma menor rigidez para a mistura M2 em frequências maiores (baixas temperaturas), enquanto as outras ficaram em patamares parecidos. Para frequências menores (altas temperaturas), essa mistura tem uma rigidez mais elevada, indicando um comportamento típico daquele observado para misturas asfálticas modificadas por polímero. Por outro lado, a mistura 04 tem baixa rigidez em baixas frequências (altas temperaturas), indicando a previsão de um comportamento ruim em relação ao defeito de deformação permanente.

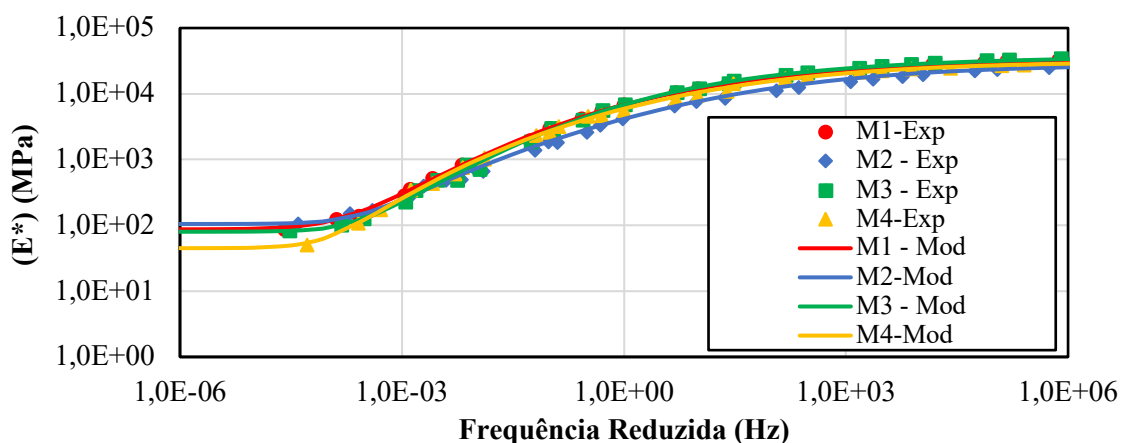


Figura 3. Curvas mestras de módulo dinâmico das misturas asfálticas

Fadiga por Tração-Compressão (T-C)

O ensaio de fadiga T-C foi realizado a 19 °C, com variação nas deformações nominais, observando como critérios de aceitação do ensaio a ruptura no terço médio (zona de medida dos LVDTs) e com número de ciclos até a ruptura (Nf) mínimo de 500 ciclos de ensaio (50 s). A representação das curvas características de dano das misturas (C vs S) são dispostas na Figura 4, para diferentes valores de amplitude de deformação (*initial strain amplitude, ISA*). Os coeficientes C11 e C12, obtidos através dos dados experimentais da curva característica de dano, das curvas G^R vs Nf e as constantes α e E_{lve} , usadas na construção das curvas de Wöhler, são apresentados na Tabela 3.



Lucas Aragão Lira, Arthur Moreira Veras, Iuri Sidney Bessa,
 Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos,
 Juceline Batista dos Santos Bastos,
 Beatriz Chagas Silva Gouveia & Jorge Barbosa Soares

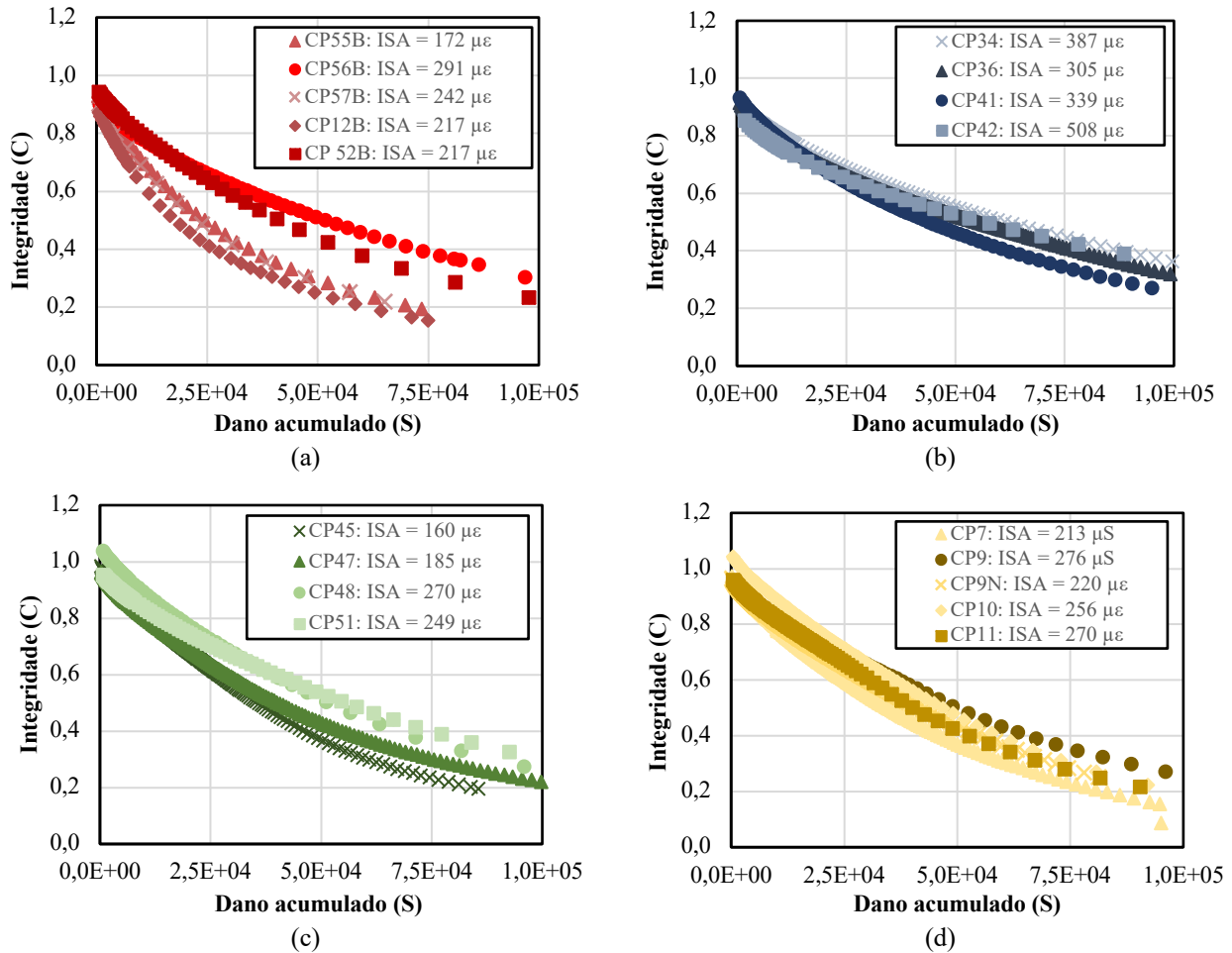


Figura 4. Curvas C vs S experimentais das misturas (a) M1, (b) M2, (c) M3 e (d) M4

Tabela 3. Parâmetros de modelagem do ensaio de fadiga T-C

Mistura	α	C vs S		G^R vs Nf		E_{lve} (MPa)
		C11	C12	Y	Δ	
1	2,9659	0,0033	0,4790	6,24E+06	-1,20348	1,31E+04
2	3,4002	0,0028	0,4747	5,84E+06	-1,21319	8,27E+03
3	2,7778	0,0005	0,6410	1,34E+09	-1,80715	1,35E+04
4	2,9365	2,9365	0,6716	1,22E+06	-1,10802	1,15E+04

As curvas de Wöhler (Figura 5a) demonstram a sensibilidade de cada mistura a partir da alteração da deformação imposta em cada ciclo. Os resultados corroboram com os dados obtidos para a mistura M2, devido à adição de polímero, porém em relação às misturas M1, M3 e M4, há comportamentos parecidos em deformações mais altas, com a mistura M3 se mostrando menos sensível à diminuição de deformações, o que influenciou o menor valor do FFM (T-C).



DOI: 10.29327/1430212.49-45

COMPARAÇÃO DO PARÂMETRO FATOR DE FADIGA DA MISTURA (FFM)
OBTIDO POR DIFERENTES ENSAIOS

A Figura 5a foi construída levando-se em consideração a temperatura de realização do ensaio CD (25°C), através dos *shift factors* do módulo complexo (E^*), e buscando minimizar as diferenças entre os dois ensaios estudados. Além disso, levou-se em consideração para sua construção as deformações 50, 100, 200 e 250 $\mu\epsilon$, obtidas através da modelagem característica na construção das curvas de Wöhler para o ensaio de T-C. Foram modeladas também, para obter o tráfego indicado (Figura 2), as curvas a 20°C.

Fadiga por Compressão Diametral (CD)

Foram realizados vários ensaios a 25 °C, com tensões diferentes para cada mistura. Os resultados estão dispostos na Figura 5b com as correspondentes curvas de tendência resultantes dos dados experimentais. Os comportamentos de resistência à fadiga observados (CD e T-C) apresentam curvas de Wöhler, de modo geral, semelhantes entre si. Foram observadas variações na ordem da curva do ensaio CD, possivelmente devido a presença de pontos *outliers* na M4.

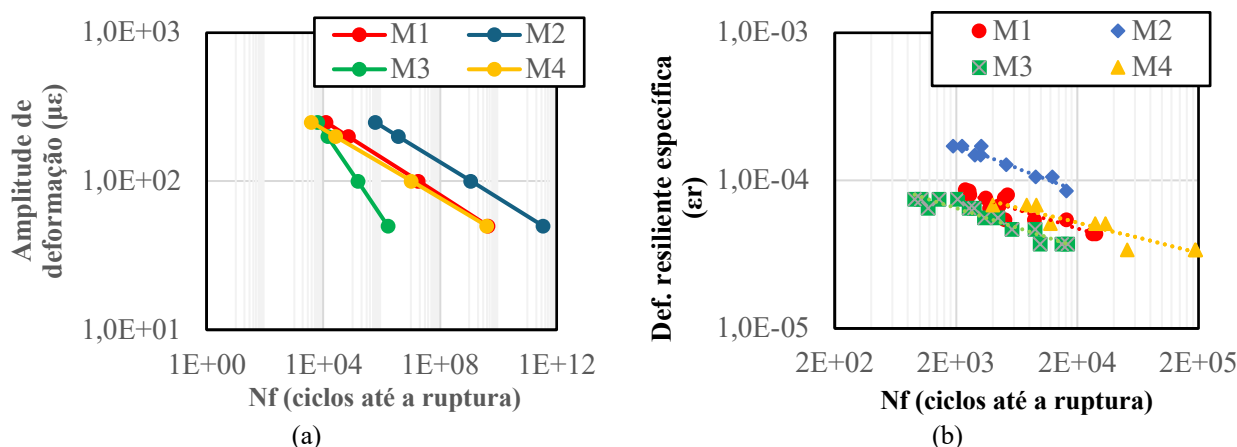


Figura 5. Curvas de Wöhler das misturas estudadas: (a) fadiga T-C e (b) fadiga CD

Para comparar a eficiência das misturas, e como a representação dos seus resultados são diferidas, optou-se por realizar uma comparação entre o FFM de ambos os ensaios de fadiga. O FFM (T-C) foi superior ao FFM (CD) em todos os casos, conforme apresentado na Tabela 4. O método de ensaio por T-C pode ser mais representativo do fenômeno da fadiga em razão das condições de carregamento e deformações ditas homogêneas (OLIVEIRA, 2019). No entanto, embora com poucos pontos de comparação, foi possível comparar o FFM entre os dois tipos de ensaio com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,98, conforme Figura 6, podendo também ser observado um valor de FFM (T-C) sempre mais alto que o FFM (CD). Pelos critérios estabelecidos pela Figura 1, para CD e pela Figura 2 para T-C, as misturas estudadas seriam recomendadas para os tráfegos mostrados na Tabela 5.

Tabela 4. Valores de FFM para ensaios de fadiga por tração-compressão (T-C) e compressão diametral (CD)

FFM	M1	M2	M3	M4
T-C (25°C)	1,82	2,35	1,40	1,72
T-C (20°C)	1,92	2,44	1,46	1,87
CD	1,01	1,37	0,79	0,84



Lucas Aragão Lira, Arthur Moreira Veras, Iuri Sidney Bessa,
Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos,
Juceline Batista dos Santos Bastos,
Beatriz Chagas Silva Gouveia & Jorge Barbosa Soares

Tabela 5. Volume de tráfego indicado para as misturas estudadas

Ensaio	M1	M2	M3	M4
T-C	>1E+08	>1E+08	<1E+06	<1E+08
CD	<1E+07	>1E+07	<7,5E+06	<7,5E+06

Embora já tenham sido realizados trabalhos que comparem o FFM dos dois tipos de ensaio, (CUSTÓDIO, 2022), não foram encontrados resultados representativos entre os FFMs de uma mesma mistura entre os dois ensaios estudados. Como não há consenso estabelecido para o cálculo desse fator no ensaio de fadiga T-C, é difícil a inclusão de outros trabalhos da literatura na comparação dos resultados deste artigo, em virtude da variação dos parâmetros da Equação 4, que no trabalho mencionado utilizou deformações entre 150 e 250 $\mu\epsilon$, levando a áreas diferentes em razão da escala log-log, e por consequência, FFMs diferentes. Também no trabalho citado não foi realizada correlação entre os fatores que pudessem sugerir algum tipo de ligação entre ambos.

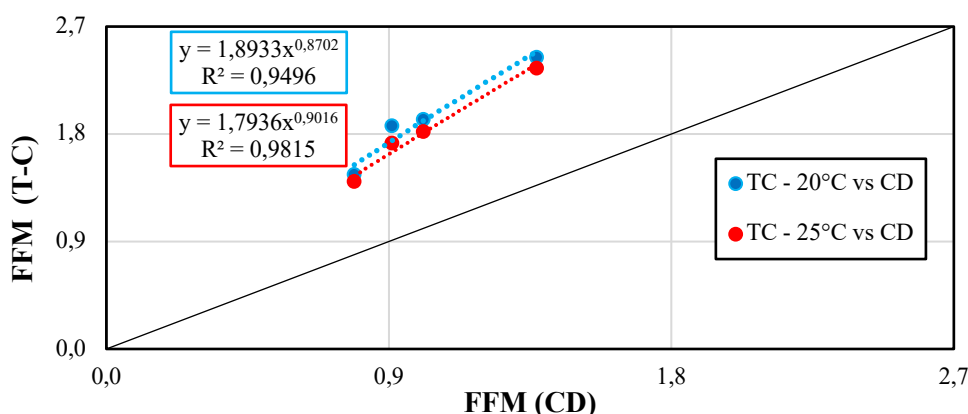


Figura 6. Comparação entre valores de FFM (T-C) e de FFM (CD)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo buscou realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos ensaios CD e T-C para quatro diferentes misturas asfálticas. Ao comparar os Fatores de Fadiga da Mistura (FFM) obtidos, observa-se que cada método oferece uma perspectiva única sobre a resistência à fadiga das misturas. O ensaio CD é aceito como uma abordagem padrão. No entanto, o ensaio T-C oferece uma análise da resposta mecânica ao longo do tempo, permitindo a observação de mudanças na rigidez e na evolução do dano. Na comparação apresentada, há indícios de que os FFMs obtidos nos ensaios T-C e CD apresentam diferenças, sendo o FFM (T-C) sempre mais alto que o FFM (CD). Além disso, a curva de Wöhler para o ensaio T-C, padronizando as temperaturas para fins de comparação, proporcionou uma melhor representação. Quanto à resistência estimada do tráfego, as classificações usadas em ambos os ensaios apresentam discrepâncias significativas, levantando-se questionamentos quanto à validade de representação de diferentes materiais em uma mesma categoria de resistência ao tráfego ou mesmo da capacidade do modelo de classe de fadiga em representar com acurácia o comportamento esperado.



DOI: [10.29327/1430212.49-45](https://doi.org/10.29327/1430212.49-45)

COMPARAÇÃO DO PARÂMETRO FATOR DE FADIGA DA MISTURA (FFM)
OBTIDO POR DIFERENTES ENSAIOS

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) pelo apoio na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AASHTO TP 107-14. Determining the damage characteristic curve of asphalt concrete from direct tension cyclic fatigue tests. Provisional standard. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2018.
- AASHTO T 342. Determining dynamic modulus of hot mix asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2011.
- BABADOPOLUS, L. F. A. L., SOARES, J. B., CASTELO BRANCO, V. T. F. Interpreting fatigue tests in hot mix asphalt (HMA) using concepts from viscoelasticity and damage mechanics. *Revista Transportes*, vol. 23(2), 2015.
- BOEIRA, F. D., PINHEIRO, G. S., SPECHT, L. P., DRUZIAN, E. L., JUST, M. L., BABADOPULOS, L. F. A. L., NASCIMENTO, L. A. H., PEREIRA, D. S. Projeto e implementação de ensaio de fadiga por tração-compressão direta (uniaxial) para avaliação de dano em misturas asfálticas. *Revista Matéria*, vol. 23(3), 2018.
- CUSTODIO, D.A.S. Caracterização à fadiga de misturas asfálticas por compressão diametral e comparação com os resultados do ensaio de tração-compressão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.
- DNIT 183/2018 – ME. Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- FRITZEN, M. A., FRANCO, F. A. C. P., NASCIMENTO, L. A. Classificação de misturas asfálticas quanto ao desempenho à fadiga. In: 9º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2019.
- GUDIPUDI, P. P., UNDERWOOD, B. S. Reliability analysis of fatigue life prediction from the viscoelastic continuum damage model. *Transportation Research Record*, vol. 2576(1), 2016.
- OLIVEIRA, J. A. Avaliação do impacto da metodologia FAD-CI de seleção granulométrica na vida de fadiga de misturas asfálticas. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- LEMAITRE, J. A course on damage mechanics, Springer Berlin, Heidelberg, 1996.
- LUCAS JÚNIOR, J. L. O., PORTELA NETO, M. G., SOARES, J. B. The effect of aggregate-binder adhesion in fatigue and moisture damage resistance in asphalt mixtures. In: The International Society for Asphalt Pavements, Fortaleza, 2018.
- NASCIMENTO, L. A. H., Implementation and validation of the viscoelastic continuum damage theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil. Tese de Doutorado. North Caroline State University, Raleigh, 2015.
- MEDINA, J., MOTTA, L.M.G. Mecânica dos Pavimentos, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2015.
- ROCHA, M. L., ESPINDOLA, R. P., ARAGÃO, F. T. S. Previsão de resistência à fadiga de misturas asfálticas: uma abordagem orientada por dados. In: 37º Congresso de pesquisa e ensino em transportes, Santos, 2023.
- ROQUE, R., ZOU, J., KIM, Y. R., BAEK, C., THIRUNAVUKKARASU, S., UNDERWOOD, B. S., GUDDATI, M. N. Top-down cracking of hot-mix asphalt layers: Models for initiation and propagation. NCHRP Project 1-42A. NCHRP, Washington, 2010.
- SABOURI, M., KIM, Y. R. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading. *Transportation Research Record*, vol. 2447(1), 2014.
- SAFAEI, F., CASTORENA, C., KIM, Y. R. Linking asphalt binder fatigue to asphalt mixture fatigue performance using viscoelastic continuum damage modeling. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, vol. 20, 2016.



Lucas Aragão Lira, Arthur Moreira Veras, Iuri Sidney Bessa,
Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos,
Juceline Batista dos Santos Bastos,
Beatriz Chagas Silva Gouveia & Jorge Barbosa Soares

SILVA, L. S. V., BASTOS, J. B. S., LUCAS JÚNIOR, J. L. O., BABADOPULOS, L. F. A. L., SOARES, J. B. Evaluation of moisture-induced damage on the fatigue life of asphalt mixtures using failure tests of asphalt binders, interfaces, and mixtures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 47(7), 2024.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R., GUDDATI, M., PELLINEN, T., RONGZONG, W., KING, G., KLUTTZ, R., GIBSON, N. Characterization and performance prediction of ALF mixtures using a viscoelastoplastic continuum damage model. In: *Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions 2006 Annual Meeting*, 2006.

ZENG, Z., KIM, Y. R., UNDERWOOD, B. S., GUDDATI, M. Asphalt mixture fatigue damage and failure predictions using the simplified viscoelastic continuum damage (S-VECD) model. *International Journal of Fatigue*, vol. 174, 2023.



EXPLORANDO O DESEMPENHO DE FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM BASE NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO LINEAR

Marcos Lamha Rocha¹; Alexis Jair Enriquez-León¹; Leni Figueiredo Mathias Leite¹; Francisco Thiago Sacramento Aragão¹; Larissa Montagner de Barros² & Luis Alberto Herrmann do Nascimento³

RESUMO

Os danos por fadiga e por deformação permanente são influenciados pelas propriedades reológicas das misturas asfálticas, tais como rigidez e capacidade de relaxação, que mudam com o envelhecimento e a incorporação de materiais reciclados ou aditivos. Reconhecendo a complexidade dessa dinâmica, o presente estudo aprofundou-se na análise reológica de misturas asfálticas, buscando estabelecer correlações entre as propriedades viscoelásticas lineares e o desempenho das misturas. Por meio de uma abordagem analítica e experimental, foram investigadas 13 misturas asfálticas utilizando uma gama de ligantes oriundos de diversas regiões do Brasil, incluindo não modificados, modificados por borracha e por polímeros. A investigação empregou parâmetros inovadores como o G-Rm, adaptado para misturas asfálticas, e o tradicional $|G^*|/\sin\delta$. Embora esses parâmetros forneçam perspectivas importantes sobre o comportamento das misturas, sua eficácia é influenciada pelas configurações do ensaio, como frequência e temperatura, destacando a importância de uma seleção cuidadosa dessas condições. A partir de métodos analíticos e experimentais, incluindo a otimização de correlações e a análise de diversas combinações de temperatura e frequência, foram identificadas configurações ótimas que realçam a relação entre as propriedades reológicas e o desempenho das misturas. Por fim, foi proposto um novo parâmetro combinando módulo dinâmico e taxa de evolução de dano (α), que obteve forte correlação com o índice de fadiga FFM.

PALAVRAS-CHAVE: pavimento; módulo dinâmico; viscoelasticidade; desempenho

ABSTRACT

Fatigue and rutting damages are influenced by the rheological properties of asphalt mixtures, such as stiffness and relaxation capacity, which change with aging and the incorporation of recycled materials or additives. Recognizing the complexity of this dynamic, the present study delved into the rheological analysis of asphalt mixtures, aiming to establish correlations between the linear viscoelastic properties and the performance of the mixtures. Through an analytical and experimental approach, 13 asphalt mixtures were investigated using a range of binders from various regions of Brazil, including unmodified, rubber-modified, and polymer-modified. The investigation employed innovative parameters such as the G-Rm, adapted for asphalt mixtures, and the traditional $|G^*|/\sin\delta$. Although these parameters provide important insights into the behavior of the mixtures, their effectiveness is influenced by the test configurations, such as frequency and temperature, highlighting the importance of a careful selection of these conditions. Through analytical and experimental methods, including the optimization of correlations and the analysis of various combinations of temperature and frequency, optimal configurations were identified to evidence the relationship between the rheological properties and the performance of the mixtures. Finally, a new parameter that combines dynamic modulus and damage evolution rate (α) was proposed and presented strong correlation with the FFM fatigue index.

KEY WORDS: pavement; dynamic modulus; viscoelastic; performance

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, marcos.rocha@coc.ufrj.br; aenriquez.eng@gmail.com; lenimathias@coc.ufrj.br; fthiago@coc.ufrj.br

² Stratura Asfaltos, Paulínia-SP, Brasil, larissa.montagner@hotmail.com

³ CENPES/Petrobras, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, luisnascimento@petrobras.com.br



INTRODUÇÃO

A fadiga do revestimento e deformação permanente da estrutura são os principais tipos de danos em pavimentos asfálticos, limitando sua durabilidade. Tem sido reconhecido que as propriedades reológicas, especificamente a rigidez e a capacidade de relaxação, desempenham um papel importante na resistência à fissuração e à deformação permanente das misturas asfálticas (ROWE; KING; ANDERSON, 2014). Com o envelhecimento, as misturas asfálticas tornam-se mais rígidas e menos capazes de relaxar e dissipar tensões ao longo do tempo, resultando em um aumento da fragilidade e na redução da resistência ao trincamento.

O uso de pavimentos asfálticos com material fresado (*Reclaimed Asphalt Pavements*, RAP) introduz um ligante envelhecido, rígido e frágil nas misturas asfálticas, afetando, em alguns casos, negativamente sua resistência ao trincamento, embora possa melhorar a resistência à formação de trilhas de rodas. Entretanto, a influência negativa sobre a fadiga pode ser atenuada com o uso de ligantes de menor rigidez e grau de desempenho (*Performance Grade*, PG) inferior, ou pela incorporação de aditivos, conhecidos como agentes de reciclagem ou rejuvenescedores (MOGAWER *et al.*, 2013). Por outro lado, as misturas mornas (*Warm Mix Asphalt*, WMA) tendem a ser menos rígidas, o que as torna mais suscetíveis à DP, mas com uma potencial melhora na resistência à fadiga. O uso de aditivos, tanto químicos quanto naturais, tem sido explorado para mitigar os efeitos da compactação a temperaturas mais baixas.

Considerando o papel central do ligante asfáltico na resposta reológica das misturas, pesquisas têm se concentrado em estabelecer correlações entre a reologia do ligante e a resistência à fadiga e à DP. Inicialmente, a ductilidade do ligante, medida a uma temperatura intermediária, mostrou-se um bom indicador do comportamento em campo em termos de trincamento (KANDHAL, 1977). No Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária (*Strategic Highway Research Program*, SHRP), adotou-se o uso do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer*, DSR) para avaliar a resistência à fadiga a partir de uma relação entre o módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e o ângulo de fase (δ) em temperaturas intermediárias ($|G^*|\sin\delta$). Adicionalmente, a rigidez à fluência e o módulo de relaxação, medidos pelo Reômetro de Flexão em Viga (*Bending Beam Rheometer*, BBR), foram introduzidos para avaliar a resistência ao trincamento em baixas temperaturas. No entanto, essas métricas não refletiram de maneira satisfatória o desempenho em campo, particularmente para o trincamento por fadiga (ROWE *et al.*, 2014). Glover *et al.* (2005) propuseram um parâmetro alternativo, a Função DSR ($G'/[\eta'/G']$), relacionando o módulo de armazenamento de cisalhamento (G') e a viscosidade dinâmica (η') do ligante a uma temperatura e frequência específicas, mostrando inicialmente uma correlação promissora com o trincamento não relacionado à carga.

O parâmetro da Função DSR, em um primeiro momento, demonstrou uma boa correlação com o trincamento não relacionado à carga. Anderson *et al.* (2011) converteram os valores limites de ductilidade para limiares do parâmetro da Função DSR de $9,00E-04$ e $1,00E-03$ MPa/s. O parâmetro da Função DSR foi refinado por Anderson *et al.* (2011) e simplificado para facilitar seu uso prático por Rowe *et al.* (2014), demonstrando eficácia na avaliação da resistência à fadiga em temperaturas intermediárias a partir do parâmetro Glover-Rowe (G-R). O G-R (Equação 1) usa $|G^*|$ e δ do ligante asfáltico medido a uma temperatura de 15°C e uma frequência de $0,005$ rad/s.



DOI: 10.29327/1430212.49-42

EXPLORANDO O DESEMPENHO DE FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS
COM BASE NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO LINEAR

$$G - R = \frac{|G^*|(\cos\delta)^2\omega}{\text{sen}\delta} \quad (1)$$

Esta simplificação, ao permitir a plotagem dos limites dos parâmetros no espaço Black (uma representação gráfica de $|G^*|$ versus δ), torna mais intuitiva a visualização de como as propriedades do ligante evoluem com o envelhecimento. Os limiares estabelecidos pela Função DSR foram adaptados para definir limites para o parâmetro G-R, estabelecendo que um valor de 180 kPa marca o início do processo de fissuração, enquanto valores de 600 kPa ou mais são indicativos de fissuração significativa (CHRISTENSEN *et al.*, 2019). A Figura 1, conforme apresentado por Rowe *et al.* (2016), emprega o parâmetro G-R no espaço Black para prever o trincamento induzido por envelhecimento, demonstrando a eficácia dessa metodologia na interpretação das mudanças nas propriedades reológicas do ligante asfáltico ao longo do tempo.

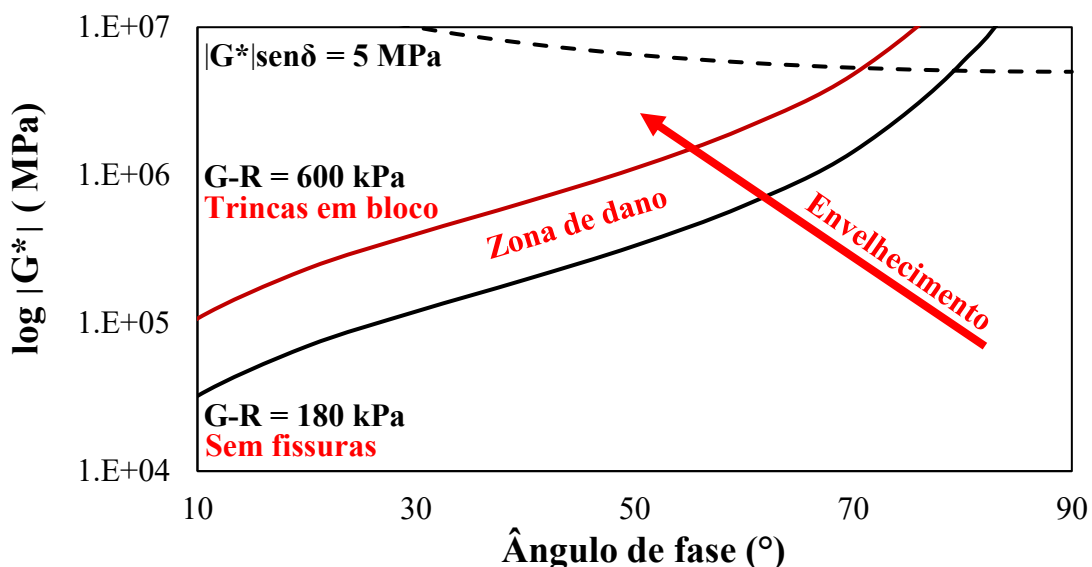


Figura 1: Espaço Black para a previsão do trincamento induzido por envelhecimento.

No que diz respeito à deformação permanente, o Superpave adotou inicialmente o parâmetro $|G^*|/\text{sen}\delta$ para avaliar a resistência do ligante asfáltico a este tipo de dano. Os ensaios são realizados com uma geometria de placas paralelas de diâmetro de 25 mm para temperaturas superiores a 58°C e de 8 mm para temperaturas entre 22°C e 37°C, sempre à frequência de 10 rad/s. Esse parâmetro é baseado no princípio de que a resistência à deformação permanente pode ser incrementada tanto pelo aumento da rigidez do material ($|G^*|$ mais alto) quanto pela melhoria de sua elasticidade relativa (valores mais baixos de δ). Sob essa perspectiva, ligantes com valores elevados de $|G^*|/\text{sen}\delta$ demonstrariam maior resistência à deformação permanente, dado que reduziriam a energia dissipada após cada ciclo de carga, relacionada ao surgimento de deformações permanentes no pavimento (BAHIA; ANDERSON, 1995, ROBERTS *et al.*, 1996). Posteriormente, foram feitas tentativas para desenvolver novos métodos de ensaio para prever o desempenho independentemente do tipo de modificação, como o ensaio Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas (*Multiple Stress Creep and Recovery*, MSCR), para caracterizações de deformação permanente.



Embora os parâmetros $|G^*|/\text{sen}\delta$ e G-R se apresentem como indicadores eficazes para avaliar a resistência à deformação permanente e à fadiga, é importante notar que ambos foram desenvolvidos especificamente para ligantes asfálticos. Considerando isso, embora seja possível estimar algumas propriedades das misturas asfálticas a partir das propriedades dos ligantes, torna-se evidente a necessidade de desenvolver métodos mais diretos e adaptados para avaliar as misturas asfálticas em si, seguindo premissas semelhantes.

Mensching *et al.* (2015) foram pioneiros na introdução do parâmetro baseado em misturas G-R (G-R_m), baseado no módulo dinâmico ($|E^*|$) e no δ da mistura asfáltica, conforme delineado na Equação 2. Visando estabelecer um único ponto de avaliação, o estudo identificou combinações específicas de temperatura e frequência, particularmente aquelas próximas aos pontos de inflexão, como indicadores promissores para avaliar a resistência das misturas asfálticas ao trincamento em baixas temperaturas.

$$G-R_m = \frac{|E^*|(\cos \delta)^2}{\text{sen } \delta} \quad (2)$$

Em um desenvolvimento subsequente, Oshone *et al.* (2018) investigaram diversas combinações de temperatura e frequência, incluindo 15°C nas frequências de 0,005 rad/s; 5 rad/s; e 500 rad/s, além de uma combinação específica ajustada ao grau de desempenho do ligante asfáltico em baixas temperaturas. Este estudo destacou o potencial do parâmetro G-R_m para diferenciar as misturas asfálticas eficazmente, em especial na combinação de 15°C e 5 rad/s, e na temperatura ajustada ao grau de desempenho do ligante mais 10°C, com uma frequência de 0,01666 rad/s.

Ogbo *et al.* (2019) propuseram explorar uma nova dimensão ao avaliar o parâmetro *Flexibility Index* (FI), utilizando o ensaio de flexão semicircular (*Semicircular Bending*, SCB) a uma temperatura fixa de 20°C e frequência de 5 Hz. Esta proposta foi reforçada pelo projeto NCHRP 09-58, que, sob condições idênticas, definiu um limiar de 8.000 MPa para o FI, sugerindo um critério robusto para a avaliação da resistência ao trincamento e à deformação (MARTINS *et al.*, 2019, MARTINS *et al.*, 2020). Habbouche *et al.* (2021) constataram uma notável correlação entre o FI, obtido do ensaio SCB, e o parâmetro G-R_m, com o CTindex (Ensaio Ideal-CT) e NF_{le} (Fadiga por compressão diametral) seguindo em ordem de relevância. A investigação de Zhang *et al.* (2022) contribuiu para essa base de conhecimento, identificando as variáveis críticas do ligante e da mistura, como os graus de desempenho do ligante (alto e baixo PG), o teor de ligante, a Relação Betume-Vazios (RBV), o volume de vazios e o teor de RAP, que influenciam significativamente o parâmetro G-R_m, além de estabelecer uma forte correlação com os resultados do ensaio SCB.

Diante deste contexto, o objetivo desta pesquisa é avaliar os parâmetros derivados de ensaios viscoelásticos lineares aplicados a misturas asfálticas, correlacionando-os com a resistência à fadiga e à deformação permanente. Essa abordagem se justifica pela necessidade de adaptar e expandir as metodologias originalmente desenvolvidas para ligantes asfálticos, como base em parâmetros como $|G^*|/\text{sen}\delta$ e G-R, por exemplo, a fim de fornecer indicadores mais diretos e aplicáveis às misturas asfálticas em si.



DOI: 10.29327/1430212.49-42

EXPLORANDO O DESEMPENHO DE FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS
COM BASE NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO LINEAR

METODOLOGIA

Neste estudo, 13 misturas asfálticas foram selecionadas para caracterização, incorporando ligantes oriundos de distintas regiões do Brasil. Estes foram categorizados em três grupos: ligantes não modificados, modificados por borracha (AB-8) e modificados por polímero, incluindo as classes 65/90, 60/85 e um ligante altamente modificado (HiMA). Os asfaltos convencionais foram classificados conforme as penetrações PEN 30/45 e 50/70. Adicionalmente, a classificação desses materiais sob o critério PG Superpave foi realizada de acordo com a norma AASHTO M332, como detalhado na Tabela 1. Gnaiss e basalto foram selecionados como agregados para compor as misturas, apresentando Tamanhos Máximos Nominais (TMNs) de 12,5 mm e 19,0 mm.

Tabela 1. Características dos ligantes, agregados e misturas avaliadas

ID	Agregado		Ligante		
	Origem	TMN (mm)	Classe	Modificação	PG
M1	Basalto - Mato Grosso do Sul	19,0	30/45	-	70S-16
M2	Basalto - Mato Grosso do Sul	19,0	65/90	Polímero	70E-22
M3	Basalto - Mato Grosso do Sul	19,0	HiMA	Polímero	76E-22
M4	Gnaiss - Minas Gerais	12,5	50/70	-	64S-22
M5	Gnaiss - Minas Gerais	12,5	30/45	-	64S-16
M6	Gnaiss - Minas Gerais	12,5	50/70	-	58S-16
M7	Gnaiss - Minas Gerais	12,5	50/70	-	64S-28
M8	Gnaiss - Minas Gerais	12,5	AB-8	Asfalto Borracha	76S-22
M9	Gnaiss - Minas Gerais	12,5	AB-8	Asfalto Borracha	70S-28
M10	Gnaiss - Minas Gerais	12,5	AB-8	Asfalto Borracha	82S-28
M11	Gnaiss - Minas Gerais	12,5	HiMA	Polímero	82E-22
M12	Gnaiss - Minas Gerais	12,5	60/85	Polímero	70H-22
M13	Gnaiss - Minas Gerais	12,5	60/85	Polímero	76S-22

Para a caracterização reológica das misturas, a primeira etapa consistiu na realização de ensaios para determinar a rigidez. O módulo de dinâmico ($|E^*|$) e o ângulo de fase (δ) foram avaliados por meio de ensaios de varredura de frequência sob condição de carregamento uniaxial, conforme especificado pela norma DNIT 416 - ME. As curvas mestras relativas a $|E^*|$ foram então elaboradas, tomando como referência a temperatura de 20°C e aplicando o princípio da superposição de frequência-temperatura. Os ensaios abrangeram frequências de 0,1 Hz a 25 Hz e temperaturas de 4°C a 54°C. Como parte complementar do estudo, as séries de Prony foram calculadas para todas as misturas, o que permitiu estimar o módulo dinâmico e o ângulo de fase em qualquer combinação de temperatura e frequência dentro do espectro de condições avaliadas. Além disso, foi calculada a taxa de evolução do dano (α), que é definida como a máxima inclinação da curva de módulo de relaxação em função do tempo reduzido, em escala log-log. O parâmetro permite comparar o potencial de relaxação dos materiais. Aqueles com menor capacidade de relaxação tendem a acumular dano mais rapidamente do que materiais com maior capacidade de relaxação.



Para a caracterização da fadiga das misturas asfálticas, foi realizado o ensaio de tensão direta uniaxial a 10 Hz e 20°C. A análise dos resultados seguiu a abordagem Simplificada do Dano Contínuo Viscoelástico (S-VECD), que integra as curvas de integridade em função do dano ($C \times S$) e de G^R em função do número de ciclos de ruptura. Os parâmetros de fadiga da mistura asfáltica avaliados foram FFM, redução média na pseudo rigidez ao longo do teste até o ponto de ruptura (D^R), e índice de capacidade de dano (S_{app}) (NASCIMENTO, 2015, WANG *et al.*, 2019).

Para a análise de deformação permanente, adotou-se o parâmetro Flow Number (FN), obtido a partir de ensaios de carga repetida uniaxial, conforme a norma DNIT 184 - ME. O FN indica o ciclo no qual inicia-se a zona de deformação permanente terciária, caracterizada pela menor taxa de deformação observada. Paralelamente, o ensaio *Stress Sweep Rutting* (SSR) foi conduzido de acordo com a AASHTO TP134. A partir dos resultados de SSR, foram obtidos parâmetros do chamado *Shift Model*, que visa capturar a influência da tensão desvio, do tempo de carga e da temperatura na deformação permanente das misturas. Adicionalmente, o *Rutting Strain Index* (RSI) foi examinado. O RSI, definido como a proporção entre a deformação permanente acumulada em uma camada asfáltica e a sua espessura ao longo de um período projetado de 20 anos, oferece uma estimativa quantitativa da susceptibilidade da mistura à formação de trilhas de rodas sob condições de tráfego pesado.

RESULTADOS

A partir do espaço Black mostrado na Figura 2, observa-se, a mistura M1 destacou-se por exibir os maiores ângulos de fase máximos, sugerindo uma maior viscosidade relativa. Por outro lado, a mistura M11 demonstrou um padrão distinto, com valores elevados de rigidez mantendo-se constantes mesmo com ângulos de fase similares nas regiões inferiores da curva. Este comportamento singular pode ser explicado pela interação entre o ligante asfáltico e os agregados. É interessante notar no espaço Black que os ângulos de fase máximos das misturas ocorreram em um ponto de rigidez intermediária, aproximadamente 1.500 MPa, sugerindo um equilíbrio entre a contribuição do ligante e dos agregados ao comportamento reológico da mistura.



DOI: 10.29327/1430212.49-42

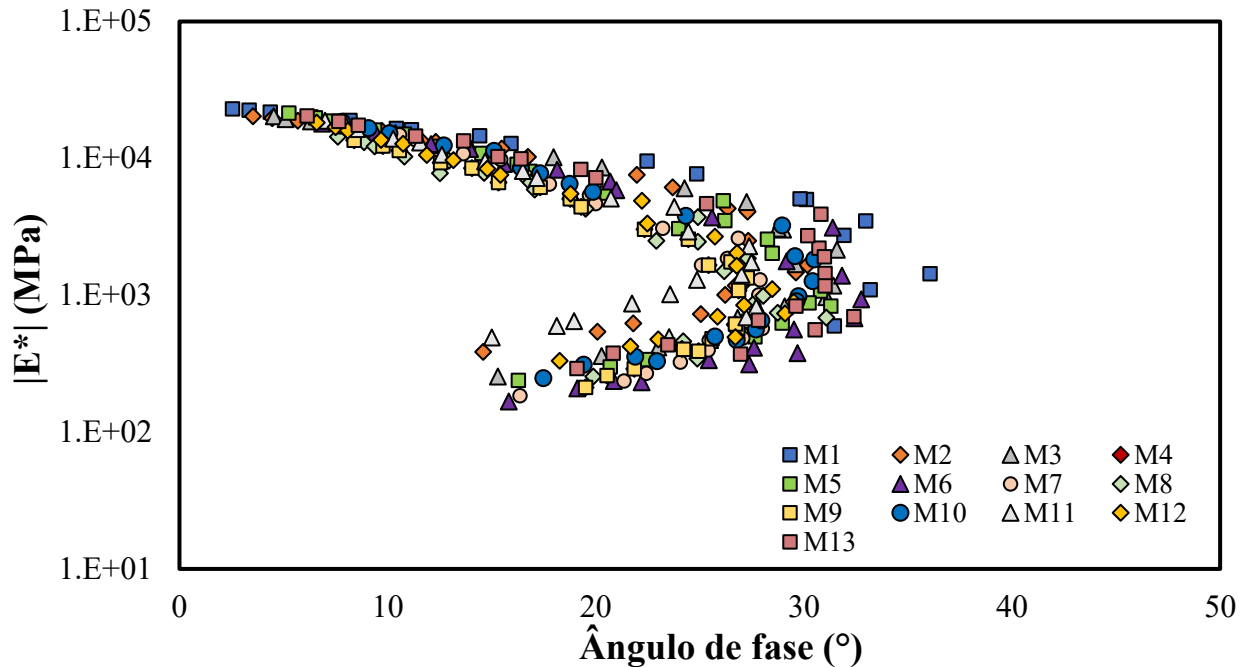
EXPLORANDO O DESEMPENHO DE FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS
COM BASE NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO LINEAR

Figura 2: Espaço Black para a misturas analisadas

Os parâmetros G-Rm foram calculados para as misturas asfálticas para condições: 15°C e 5 rad/s; PGLT + 10°C e 0,01666 rad/s; e 20°C e 5 Hz. Os resultados, ilustrados na Figura 3, incluem um ranqueamento para cada mistura com base em seu desempenho sob essas condições. Notavelmente, os ranqueamentos obtidos com as combinações de 15°C e 5 rad/s e 20°C e 5 Hz apresentaram consistência entre si, ao passo que a metodologia empregando a combinação PGLT + 10°C e 0,01666 rad/s resultou em ranqueamentos divergentes. Por exemplo, enquanto a mistura M1 alcançou o mais alto valor de G-Rm nas condições de ensaio de maior temperatura e frequência, na metodologia baseada no PG, ela foi apenas a oitava colocada. Inversamente, a mistura M11 se destacou com o maior valor de G-Rm na segunda metodologia, mas obteve um ranqueamento inferior nas outras combinações.

Essa discrepância pode ser atribuída ao fato de a segunda metodologia adotar temperaturas significativamente mais baixas em comparação com as demais, tornando-a potencialmente mais alinhada à avaliação do desempenho relativo ao trincamento térmico do que à fadiga. Tal variação nos resultados sublinha como a sensibilidade dos parâmetros de desempenho das misturas asfálticas é profundamente afetada pelas condições de temperatura e frequência empregadas nos ensaios.



Marcos Lamha Rocha, Alexis Jair Enríquez-León,
 Leni Figueiredo Mathias Leite, Francisco Thiago Sacramento Aragão,
 Larissa Montagner de Barros & Luis Alberto Herrmann do Nascimento

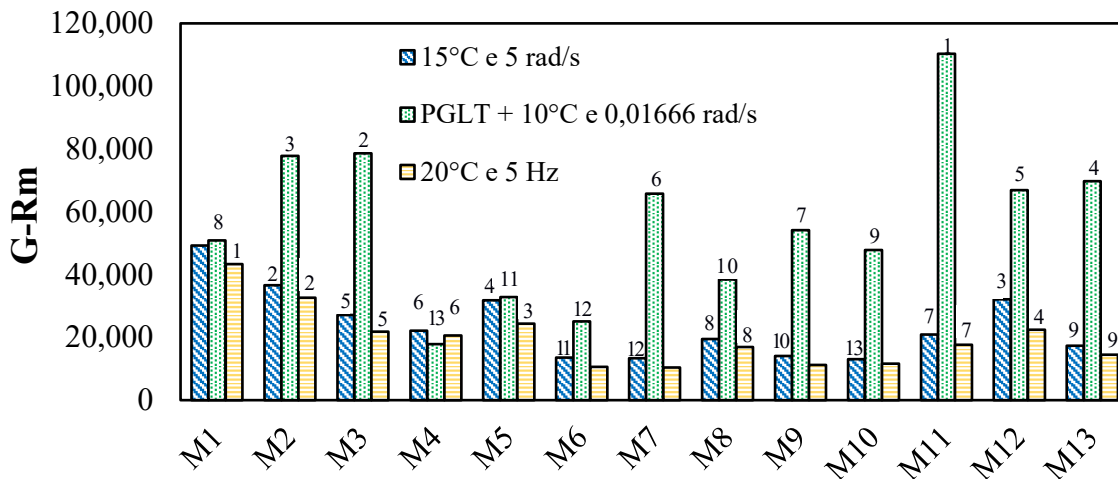


Figura 3: Valores de G-Rm pelos três métodos para as misturas

Para aprofundar a análise de deformação permanente nas misturas asfálticas, foi adotada uma abordagem que se alinha à usada para os ligantes, substituindo o parâmetro $|G^*|/\text{sen}\delta$, obtido a partir de ensaios cíclicos de torção, pelo $|E^*|/\text{sen}\delta$, obtido a partir de ensaios cíclicos uniaxiais. As temperaturas selecionadas para este estudo foram 54°C, correspondente à temperatura máxima registrada durante o ensaio de módulo dinâmico, optando-se conscientemente por não extrapolar além desse ponto, e 40°C, uma temperatura inferior, que ainda se mostrou significativa para observar os efeitos de deformação permanente. A frequência de 1,59 Hz foi escolhida por ser equivalente a 10 rad/s, alinhando-se à frequência utilizada nos ensaios de ligante.

Os resultados desta análise são apresentados na Figura 4, destacando-se os valores do parâmetro para cada uma das misturas. Observou-se uma consistência nos ranqueamentos entre as duas temperaturas analisadas. Interessantemente, as misturas M1, M2 e M11 emergiram como as de maior resistência à deformação permanente, demonstrando os valores mais elevados do parâmetro $|E^*|/\text{sen}\delta$.

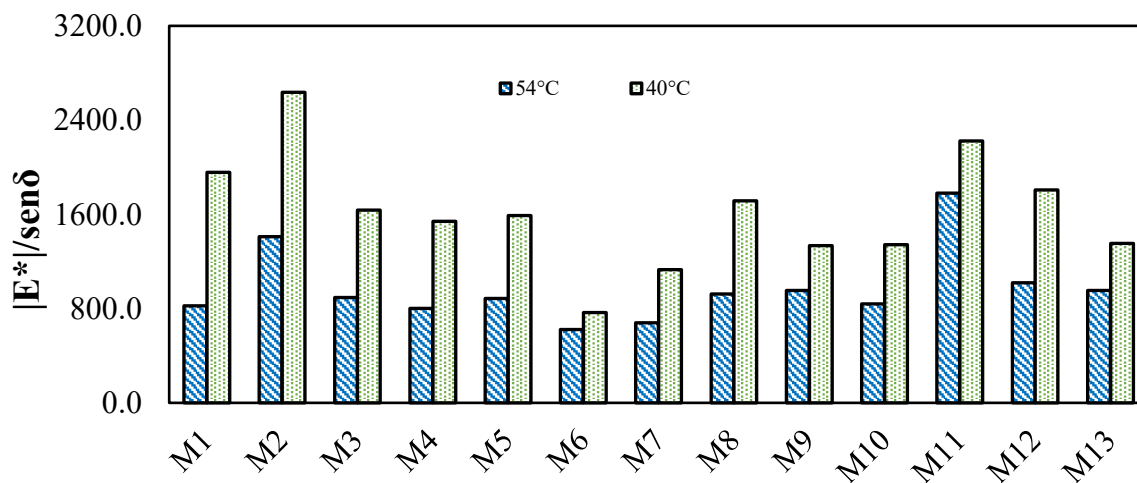


Figura 4: Valores de $|E^*|/\text{sen}\delta$ para as misturas ensaiadas a 40°C e 54°C



DOI: 10.29327/1430212.49-42

EXPLORANDO O DESEMPENHO DE FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS
COM BASE NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO LINEAR

Em seguida foram avaliadas as correlações entre os parâmetros analisados e os parâmetros de fadiga e de deformação permanente. A Figura 5 revela que, para 15°C e 5 rad/s, o parâmetro G-Rm se correlaciona de forma moderada e consistente com todos os três parâmetros de fadiga analisados. No entanto, a 20°C e a 5 Hz, observou-se uma correlação levemente inferior com o índice S_{app} . A configuração PGLT + 10°C e 0,01666 rad/s, por sua vez, apresentou as correlações mais fracas.

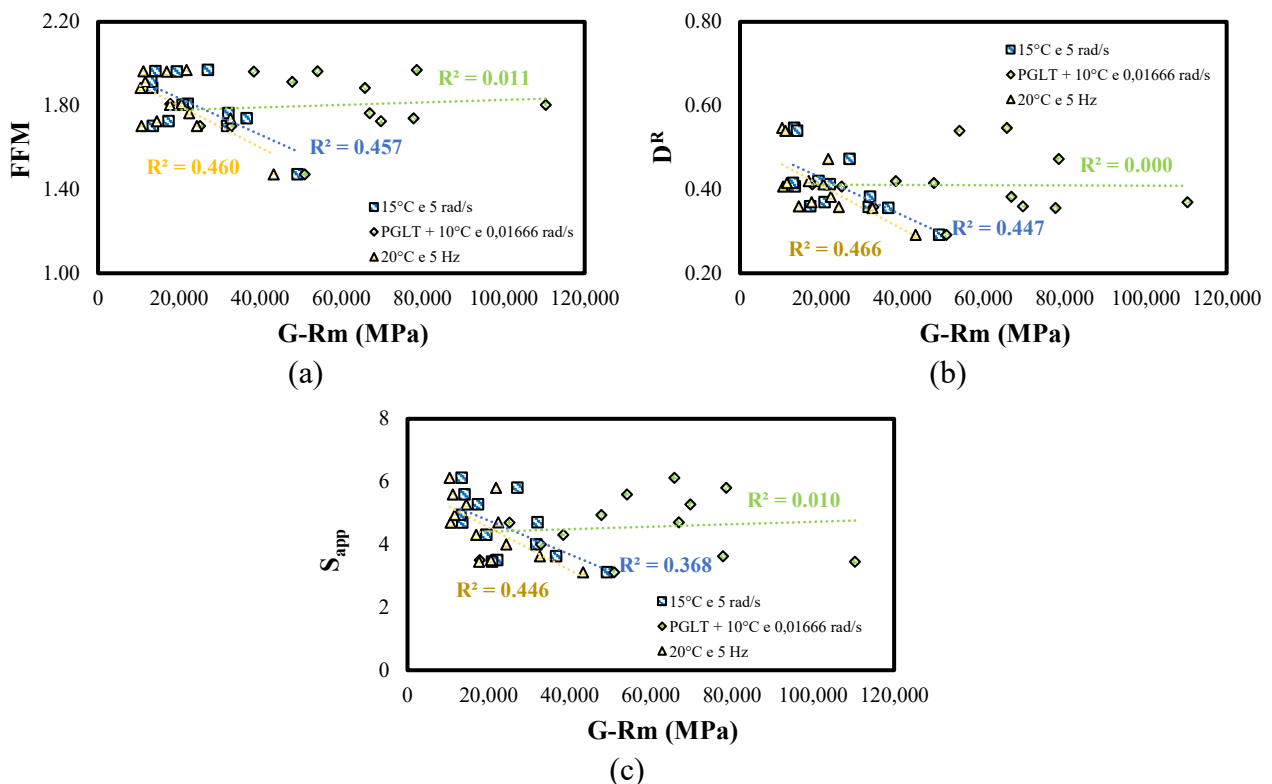


Figura 5: Correlação entre G-Rm com: a) FFM; b) D^R e c) S_{app}

A Figura 6 destaca as relações entre $|E^*|/\text{sen}\delta$ a 54°C e a 40°C e os índices de deformação permanente FN e RSI. Notavelmente, as correlações com o FN se mantiveram similares em ambas as temperaturas avaliadas, com valores intermediários de correlação. Em contraste, o parâmetro RSI mostrou uma correlação mais forte a 40°C do que a 54°C, potencialmente devido à inclusão dos resultados do ensaio SSR a 20°C na sua avaliação, indicando uma sensibilidade a um espectro mais amplo de temperaturas.

Com o objetivo de aprimorar a compreensão dessas correlações, realizou-se a otimização dos coeficientes de correlação (R^2), ajustando as temperaturas e frequências para maximizar o valor de R^2 para cada parâmetro de desempenho. Essa otimização foi realizada utilizando a ferramenta Solver do Excel, com a restrição de manter as condições dentro dos limites experimentais de 4°C a 54°C para temperatura e de 0,1 Hz a 25 Hz para frequência. Os resultados dessa otimização são resumidos na Tabela 2, evidenciando que, para os parâmetros de fadiga, o índice D^R se associou a temperaturas e frequências mais baixas, resultando em valores de G-Rm superiores quando comparado aos índices FFM e S_{app} . Isso sugere que o parâmetro D^R pode ser um indicador mais sensível às condições de



Marcos Lamha Rocha, Alexis Jair Enríquez-León,
 Leni Figueiredo Mathias Leite, Francisco Thiago Sacramento Aragão,
 Larissa Montagner de Barros & Luis Alberto Herrmann do Nascimento

ensaio que resultam em maior rigidez. Comparativamente, FFM e S_{app} apresentaram temperaturas otimizadas similares, mas o FFM mostrou uma ligeira vantagem na correlação com o G-Rm.

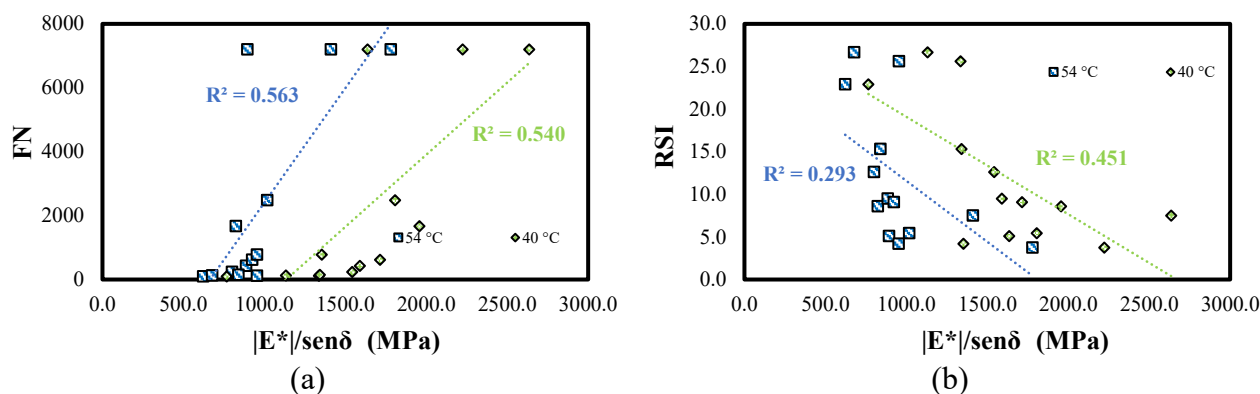


Figura 6: Correlação entre $|E^*|/\text{sen}\delta$ com: a) FN; e b) RSI

Na análise da deformação permanente, identificou-se que o FN se correlacionou melhor com temperaturas mais altas e frequências mais baixas, indicando uma propensão à deformação permanente em misturas com menor rigidez, em contraste com o índice RSI, que demonstrou uma preferência por misturas com valores de rigidez mais elevados.

Tabela 2. Combinações de temperatura e frequência otimizadas e sugeridas para os parâmetros de desempenho

Parâmetro	Otimizada			Sugerida		
	Temp. (°C)	Freq. (Hz)	R ²	Temp. (°C)	Freq. (Hz)	
G-Rm	FFM	16,88	5,02	0,536	17,00	5,00
	D ^R	6,90	0,55	0,521	7,00	0,50
	S_{app}	17,87	1,72	0,461	18,00	2,00
$ E^* /\text{sen}\delta$	FN	54,00	0,57	0,599	54,00	0,50
	RSI	49,19	11,13	0,509	49,00	10,00

No último segmento de resultados, investigou-se a inclusão do parâmetro alpha (α) na fórmula G-Rm para melhorar as previsões de fadiga, uma vez que é calculado a partir das propriedades viscoelásticas lineares do material. O parâmetro corresponde à taxa de evolução do dano, definida como a máxima inclinação da curva módulo de relaxação vs tempo reduzido, em escala log-log. Foram explorados diferentes modelos de regressão (linear e de potência) e diversas condições de temperatura e frequência. O modelo de potência provou ser mais eficaz na correlação com o FFM. Assim, introduziu-se o GRm- α , descrito pela Equação 3, e os resultados são ilustrados na Figura 7, que mostra valores de FFM e GRm- α , com um R² de 0,89, destacando a forte correlação entre os parâmetros. Tais resultados podem indicar o novo parâmetro como uma estimativa inicial do comportamento à fadiga da mistura asfáltica com apenas os dados viscoelásticos lineares.

$$GR_m - \alpha = \left(\frac{|E^*|(\cos \delta)^2}{\text{sen } \delta} \right)^A \times (\alpha)^B \tag{3}$$



DOI: [10.29327/1430212.49-42](https://doi.org/10.29327/1430212.49-42)

EXPLORANDO O DESEMPENHO DE FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS
COM BASE NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO LINEAR

Onde: $|E^*|$ e δ são obtidos na temperatura de 20°C e na frequência de 10 Hz; $A = -0,075$ e $B = 0,766$.

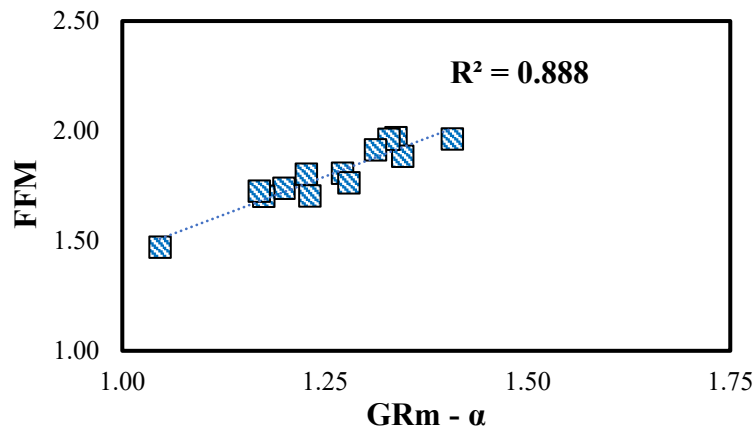


Figura 7: FFM previsto e observado calculado pelo GRm- α

CONCLUSÕES

Neste estudo, foram investigadas as propriedades reológicas de misturas asfálticas sob variadas condições de ensaio, explorando a influência dessas condições nos parâmetros de desempenho relacionados à fadiga e à deformação permanente.

A seleção das condições de ensaio, incluindo temperatura e frequência, tem um impacto significativo na avaliação do desempenho das misturas asfálticas, sugerindo a necessidade de uma escolha criteriosa dessas condições para garantir avaliações precisas. Além disso, identificou-se que o parâmetro G-Rm fornece correlações moderadas a fortes com os indicadores de fadiga e deformação permanente, embora sua eficácia possa variar com as condições específicas de ensaio. Este estudo também revelou que diferentes metodologias de ensaio podem resultar em ranqueamentos variados para as misturas. A otimização das condições de ensaio a partir da análise de correlação sugeriu combinações de temperatura e frequência que podem oferecer as avaliações mais acuradas dos parâmetros de desempenho, destacando a importância de uma abordagem personalizada para cada tipo de análise de desempenho. Por último, um novo parâmetro, GRm- α , foi proposto levando em conta os dados de módulo dinâmico, ângulo de fase e taxa de evolução de dano. Os resultados do novo índice mostraram fortes correlações ($R^2 = 0,89$) com o parâmetro de fadiga FFM.

Essas conclusões sublinham a complexidade inerente à caracterização das misturas asfálticas e a importância de se considerarem nuances de cada metodologia de ensaio para entender adequadamente o comportamento e o desempenho desses materiais em aplicações reais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), do CENPES/PETROBRAS e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, R.M., King, G.N., Hanson, D.I. and Blankenship, P.B. Evaluation of the relationship between asphalt binder properties and non-load related cracking. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2011. 80.
- Bahia, H.U. and Anderson, D.A. Strategic highway research program binder rheological parameters: background and comparison with conventional properties. *Transportation research record*, 1995 (1488).
- Christensen, D., Mensching, D., Rowe, G., Anderson, R. M., Hanz, A., Reinke, G., and Anderson, D. Past, present, and future of asphalt binder rheological parameters: Synopsis of 2017 Technical Session 307 at the 96th Annual Meeting of the Transportation Research Board. 2019. *Transportation Research Circular*, (E-C241).
- Glover C. J, Davison R. R, Domke C. H, Ruan Y, Juristyarini P, Knorr D. B, Jung SH. Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation. *Texas Dept Transport*. 2005 Aug;1872:1-334.
- Habbouche, J., Boz, I. and Diefenderfer, S.D. Validation of performance-based specifications for surface asphalt mixtures in virginia. *Transportation Research Record*, 2022. 2676(5), pp.277-296.
- Kandhal P. S. Low-temperature ductility in relation to pavement performance. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 1977 Jan 1.
- Martin, A. E, Kaseer, F., Arámbula-Mercado, E., Bajaj, A., Daniel, J., Hajj, E., Morian, N. and Ogbo, C. Component materials selection guidelines and evaluation tools for binder blends and mixtures with high recycled materials content and recycling agents. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2019. 88.
- Martin, A.E., Kaseer, F., Arámbula-Mercado, E., Bajaj, A., Cucalon, L.G., Yin, F., Chowdhury, A., Epps, J., Glover, C., Hajj, E.Y. and Morian, N. Evaluating the effects of recycling agents on asphalt mixtures with high RAS and RAP binder ratios, 2020. (No. Project 09-58).
- Mensching, D.J., Rowe, G.M., Daniel, J.S. and Bennert, T. Exploring low-temperature performance in Black Space. *Road Materials and Pavement Design*, 2015. 16(sup2), pp.230-253.
- Mogawer W.S, Booshehrian A, Vahidi S, Austerman AJ. Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. 2013 Aug 1;14(sup2):193-213.
- Nascimento, L. A. H. Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. North Carolina State University. Ph.D. Dissertation. 2015.
- Ogbo, C., Kaseer, F., Oshone, M., Sias, J.E. and Martin, A.E. Mixture-based rheological evaluation tool for cracking in asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 2019. 20(sup1), pp.S299-S314.
- Oshone, M., Ghosh, D., Dave, E.V., Daniel, J.S., Voels, J.M. and Dai, S. Effect of mix design variables on thermal cracking performance parameters of asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2018. 2672(28), pp.471-480.
- Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y. and Kennedy, T.W. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. 2nd Ed., National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, 1996. Lanham, MD.
- Rowe, G., King, G. and Anderson, M. The influence of binder rheology on the cracking of asphalt mixes in airport and highway projects. *Journal of Testing and Evaluation*, 2014. 42(5), pp.1063-1072.
- Rowe, G.M. and Sharrock, M.J. Cracking of asphalt pavements and the development of specifications with rheological measurements. In 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2-16. Prague, Czech Republic.
- Wang, Y., & Richard Kim, Y. Development of a pseudo strain energy-based fatigue failure criterion for asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 2019. 20(10), 1182-1192.
- Zhang, R., Huang, J. and Zheng, W. Evaluation of the significance of different mix design variables on asphalt mixtures' cracking performance measured by laboratory performance tests. *Construction and Building Materials*, 2022. 350, p.128693.



UTILIZAÇÃO DO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE® (CGS) NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)

Edilza Rakel Nóbrega Cavalcanti¹; Talita Miranda de Sousa²; Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena³; Osires de Medeiros Melo Neto⁴ & Maria Ingridy Lacerda Diniz⁵.

RESUMO

No Brasil, país predominantemente rodoviário, tem-se motivado a busca por métodos de pavimentação que ofereçam conforto e segurança aos usuários garantindo entre outras características, uma boa aderência pneu-pavimento e a drenagem eficaz das águas superficiais. Neste contexto, surgem as Camadas Porosas de Atrito (CPA), uma tecnologia utilizada como revestimento de pavimentos, e que tem por característica o elevado índice de vazios, entre 18 e 25%. A finalidade dessa pesquisa foi contribuir nas investigações sobre a viabilidade do uso do compactador giratório Superpave (CGS) na dosagem da CPA. Desta forma, objetivou-se implementar a compactação por amassamento, que simula mais fielmente a compactação de campo, à realidade da dosagem brasileira para camadas porosas de atrito, que atualmente é feita por meio da metodologia Marshall. Avaliou-se os efeitos da compactação CGS na mistura CPA por meio de ensaios de caracterização volumétrica e mecânica, sendo eles: volume de vazios, vazios comunicantes, desgaste cântabro, resistência à tração, escorrimto, módulo de resiliência e dano por umidade induzida. Para isto, foram realizadas compactações no CGS de misturas asfálticas com cinco teores de ligante distintos, onde o teor de projeto definido foi de 4,5% de ligante para a CPA. Os resultados encontrados estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas DNIT-ES 386 e ASTM D7064, apontando a viabilidade do uso da compactação CGS em misturas asfálticas tipo CPA, dosadas de acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma brasileira, acrescentando à metodologia nacional, às vantagens da compactação por amassamento.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação; Compactação; Camada Drenante; Volumetria; Desempenho Mecânico.

ABSTRACT

In Brazil, a predominantly road-based country, there's a growing interest in pavement methods ensuring user comfort, safety, good tire-pavement adhesion, and effective surface water drainage. Porous Friction Courses (PFC) have emerged as a pavement coating technology characterized by high void content, typically between 18 and 25%. This research aimed to explore the feasibility of using the Superpave Gyrotory Compactor (SGC) in PFC mix design. It sought to adapt the compaction method to better simulate field conditions, aligning with Brazilian PFC design practices currently based on Marshall methodology. The study evaluated the effects of SGC compaction on PFC mixtures through volumetric and mechanical characterization tests including void volume, interconnected voids, Cantabro abrasion, tensile strength, rutting, resilience modulus, and moisture-induced damage. Compaction trials were conducted using SGC on asphalt mixtures with five different binder contents, with a target binder content of 4.5% for PFC. Results complied with DNIT-ES 386 and ASTM D7064 standards, indicating the feasibility of SGC compaction for PFC mixtures designed according to Brazilian standards, thus enhancing national methodology with the benefits of gyrotory compaction.

KEY WORDS: Paving; Compaction; Drainage Layer; Volumetry; Mechanical Performance.

^{1,2,3,4,5} Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Engenharia de Pavimentos - UFCG/DEC/LEP, engedilzarakelnobrega@gmail.com; talita.miranda@hotmail.com; lucenafb@uol.com.br; osiresdemedeiros@gmail.com; mariaingridydiniz@gmail.com.



INTRODUÇÃO

No Brasil, país predominantemente rodoviário, tem-se motivado a busca por métodos de pavimentação que permitam suprir as necessidades desse modal unindo qualidade, conforto e segurança aos usuários e à população aos seus arredores. Estudos sobre a funcionalização do pavimento, isto é, a utilização da estrutura do pavimento para o desempenho de funções para além das convencionais, sugerem o uso das misturas asfálticas porosas, dentre elas as Camadas Porosas de Atrito (CPA), que foram concebidas com a finalidade de conferir ao pavimento, sobretudo à superfície de rolamento, melhoria das condições de aderência pneu-pavimento, rápido escoamento das águas superficiais para o sistema de drenagem, dentre outras propriedades funcionais (BERNUCCI *et al.*, 2022; ALECRIM *et al.*, 2022).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em sua especificação de serviço 386 (1999), define a CPA como um material utilizado como revestimento em rodovias, que tem por característica um processo de seleção de agregados que fazem com que a massa asfáltica apresente uma composição granulométrica aberta, com elevado índice de vazios (18 a 25%) após a compactação. Os parâmetros de dosagem analisados pela especificação brasileira, conforme metodologia Marshall, são volume de vazios, desgaste por abrasão- cântabro e resistência a compressão diametral (RT), (BERNUCCI *et al.*, 2022).

A American Society for Testing and Materials (ASTM) por meio da especificação D7064 (2021) normatiza a dosagem de mistura com granulometrias abertas, da qual o CPA faz parte, com a recomendação de que o índice de vazios após a compactação seja de no mínimo 18%. A norma recomenda ainda, a utilização do compactador giratório Superpave, sob uma aplicação de 50 giros. Esse método de compactação, por amassamento é o que mais se aproxima da compactação em campo, sendo essa uma das grandes vantagens do seu uso nas pesquisas sobre misturas asfálticas.

Numa mistura com graduação aberta, o movimento da água durante a drenagem e a ação de agentes externos tornam o pavimento vulnerável devido ao elevado volume de vazios e à fraca resistência de ligação entre o ligante e os agregados (WANG; LI, 2018; CHU; FWA, 2019). Rivera *et al.* (2022) destacam que uma das principais limitações na utilização das misturas porosas é sua vida útil reduzida, logo, comumente faz-se o emprego de ligantes asfálticos modificados (ligante modificado por polímero regular ou borracha asfáltica), com a finalidade de aumentar a durabilidade.

Del Carpio (2014) e Knabben (2017) destacam que para a dosagem de uma mistura porosa ainda não é embasada em método único e normativo, e que a dosagem realizada por meio do compactador giratório Superpave foi desenvolvida, basicamente, para misturas densas. Sendo assim, é possível que se dose misturas asfálticas porosas pela metodologia Superpave.

Portanto, com embasamento nos estudos já existentes acerca dessa tecnologia, e diante da necessidade de entendê-la e aprimorá-la a fim de tornar seu uso no Brasil viável e satisfatório, o objetivo dessa pesquisa é contribuir nas investigações sobre a viabilidade do uso do compactador giratório Superpave na dosagem da CPA com base os parâmetros estabelecidos pela norma DNIT-ES 386/99. Desta forma, objetivou-se acrescentar a vantagem da compactação por amassamento, que simula mais fielmente a compactação em campo, à realidade da dosagem brasileira para camadas porosas de atrito.



DOI: 10.29327/1430212.49-25

UTILIZAÇÃO DO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE® (CGS)
NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)

METODOLOGIA

Materiais

Ligante Asfáltico

Os ligantes-polímero elastoméricos são classificados pela DNIT 129/11 quanto ao ponto de amolecimento e a recuperação elástica a 25 °C, em 55/75-E, 60/85-E e 65/90-E. Apesar da norma DNIT 386/99 especificar apenas o uso de ligante asfáltico modificado por polímero SBS em misturas do tipo CPA, Ceratti et al., (2015) destacam que entre os três tipos de asfalto borracha disponíveis no mercado brasileiro, aqueles mais indicados para o uso em camadas porosas de atrito são: o 60/85-E e o 65/90-E. No então, na região Nordeste, há uma maior disponibilidade do ligante Asfáltico Modificado por Polímero (AMP) 55/75-E, por isso, o ligante utilizado nesta pesquisa foi o asfalto borracha 55/75-E, adquirido na obra na BR 230 – Paraíba. A Tabela 1 apresenta a caracterização física do ligante, bem como as normas referentes a cada ensaio e seus limites. Todos os ensaios de caracterização do ligante, com exceção do ensaio de recuperação elástica, foram repetidos após o envelhecimento a curto prazo, por oxidação e evaporação.

Tabela 1. Caracterização do Asfalto borracha.

Característica	Normas	Limites	Resultados
Ponto De Amolecimento (°C)	ABNT NBR 6560	55 (mín.)	48,5
Penetração (0,1mm)	ABNT NBR 6576	45 -70	57
Recuperação Elástica (%)	ABNT NBR 15086		76
Viscosidade Rotacional			
Temperatura 135°C (cP)		3000 (máx.)	1577,5
Temperatura 150°C (cP)	ABNT NBR 15184	2000 (máx.)	726,0
Temperatura 177°C (cP)		1000 (máx.)	245,5
RTFOT	ASTM D 2872		
Perda de Massa (%)		1,0 (máx.)	0,0205
Penetração Retida (%)	ABNT NBR 6576	-	82
Varição do Ponto de Amolecimento (°C)	ABNT NBR 6560	-5 a +7	+5
Recuperação Elástica Retida (%)	ABNT NBR 15086	80 (mín)	80

Como mostra a Tabela 1, todos os resultados obtidos nos ensaios, antes e após o envelhecimento pelo método Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT) do ligante, estão dentro dos limites estabelecidos por suas respectivas normas viabilizando, assim, o uso do ligante nesta pesquisa. O resultado variação de massa obtida pelo ensaio de RTFOT está dentro do limite de 0,5% estabelecido pela norma 095 (2006) do DNIT, logo, o ligante encontra-se dentro da tolerância de envelhecimento sem interferir na qualidade do pavimento.

Agregados

Os agregados graníticos utilizados foram: brita 19mm, brita 12,5mm e pó de pedra. Estes foram fornecidos pela empresa Rocha Cavalcante, oriundos de pedra própria com sede em Campina Grande – PB. O filer utilizado foi a cal hidratada proveniente do comércio local.



Para determinação da granulometria dos agregados esta pesquisa seguiu a metodologia de ensaio descrita na especificação 083 de 1998 do DNIT. Obtendo-se a curva granulométrica demonstrada na Figura 1.



Figura 1. Curvas granulométricas dos agregados.

As curvas granulométricas da Figura 1, demonstram que os agregados graúdos utilizados nessa pesquisa apresentam uma granulometria uniforme, já o pó de pedra apresentou uma granulometria densa. Os resultados da caracterização dos agregados utilizados nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização física dos agregados

Ensaio	Normas	Limites	Brita 19mm	Brita 12,5mm	Pó de Pedra
Massa Específica Real (g/cm ³)		-	2,26	2,07	2,47
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	DNIT ME 413/19 e DNIT ME 411/21	-	2,27	2,09	2,49
Absorção (%)		≤ 2	0,50	0,70	0,70
Abrasão Los Angeles (%)	DNIT ME 035/98	≤ 55	18,97	22,16	-
Equivalente Areia (%)	DNIT ME 054/97	≥ 55	-	-	56,38

As massas específicas calculadas foram utilizadas no cálculo das densidades máximas da mistura. Para o índice de absorção pode-se concluir que o agregado utilizado nessa pesquisa é pouco poroso. Quanto ao desgaste por abrasão Los Angeles, os agregados graúdos apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos por norma de 55%, no ensaio de equivalente areia, o agregado miúdo apresentou-se dentro dos limites estabelecidos por norma de 55%. Portanto, os agregados foram considerados adequados para uso em misturas asfálticas.

Métodos

Dosagem

Para determinação da composição granulométrica da mistura, analisou-se o resultado dos ensaios de granulometria dos agregados e constatou-se que a composição da mistura estudada se enquadra na faixa V recomendada pelo DNIT-ES 386/99, para CPA, como na figura 2.



DOI: 10.29327/1430212.49-25

UTILIZAÇÃO DO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE® (CGS) NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)

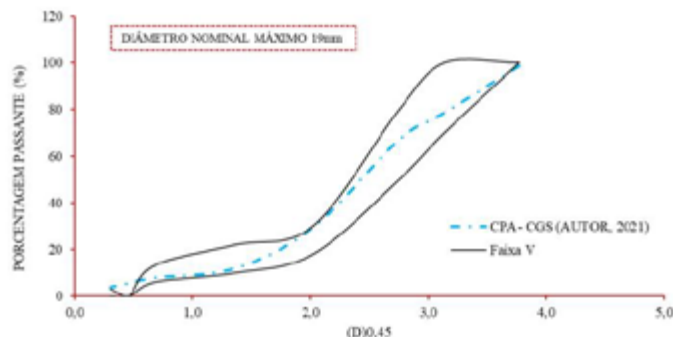


Figura 2. - Curva da composição granulométrica do CPA.

Desta forma, a composição da mistura asfáltica do tipo CPA desta pesquisa foi elaborada a partir de 29% de brita 19mm, 60% de brita 12,5mm, 8% de pó de pedra e para suprir uma carência detectada de finos foi acrescido a mistura 3% de filer. A composição elaborada por Schneider (2016) se aproximou bastante da desenvolvida nesta pesquisa e também se enquadrou na Faixa V estabelecida pelo DNIT-ES 386 (1999).

A metodologia utilizada para determinação das temperaturas de usinagem e compactação consiste em determinar graficamente, na qual para a primeira, o ligante deve ter uma viscosidade rotacional de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, já para se definir a segunda, o ligante deve apresentar viscosidade rotacional de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. Logo, as temperaturas foram 185°C para usinagem e 173°C para compactação. As temperaturas encontram-se nos limites apresentados por Domingos et al (2012) em seu artigo, que demonstra a eficácia do uso desse método, que convencionalmente é utilizado para determinação de temperaturas em ligantes puro, em ligantes modificados.

Os corpos de prova foram compactados em cinco teores de ligante distintos, observando o intervalo estabelecido pela DNIT-ES 386 (1999) de 4% a 6%. A princípio, os teores foram determinados acrescentando ao limite inferior (4%) + 0,5%. Entretanto, nas primeiras misturas verificou-se que para teores acima de 5,0% a quantidade de ligante apresentava-se elevada, gerando grandes perdas do ligante no recipiente de mistura. Para evitar possíveis problemas como exsudação do ligante foi decidido excluir o maior teor e acrescentar um teor -0,5% ao limite inferior da norma, obtendo-se a seguinte configuração: 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%.

A fim de determinar o teor de projeto de ligante asfáltico, por meios dos ensaios de volume de vazios, determinação da perda de massa por abrasão cântabro e resistência à tração indireta por compressão diametral foram compactados três corpos de prova para cada um dos teores. A compactação foi feita no CGS, configurado para realizar 50 giros, com pressão aproximada de 600 kPa e ângulo de $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$, segundo a ASTM D7064 (2021).

Caracterização Mecânica E Hidráulica Da Mistura CPA

Nesta pesquisa, os ensaios mecânicos e hidráulicos, apresentados na Tabela 3, permitiram analisar o comportamento das misturas asfálticas, mediante a dosagem realizada com base nos parâmetros determinados na especificação DNIT-ES 386 (1999) e a compactação com uso do CGS. Para que fosse possível a análise, os corpos de prova foram sujeitos aos ensaios de caracterização, estabelecidos pela norma americana que regulamenta misturas abertas do tipo CPA, ASTM D7064 (2021).



O ensaio de caracterização hidráulica permitiu que se verificasse a capacidade da mistura de manter sua característica funcional, sendo dosada pelos parâmetros da DNIT-ES 386 (1999) e compactada pelo CGS.

Tabela 3. Ensaio e normas utilizadas para caracterização mecânica e hidráulica das misturas.

Ensaio	Normas
Resistência à tração indireta por compressão diametral	DNIT ME 136/18
Módulo de resiliência	NBR 16018/11
Determinação do dano por umidade induzida	DNIT 180/18
Determinação da perda de massa por abrasão - Cântabro	DNIT 383/99
Escorrimento do ligante	ASTM D6390/21
Volume de vazios	DNIT 117/94 e 427/20
Vazios comunicantes	-

RESULTADOS E DISCUSSÕES

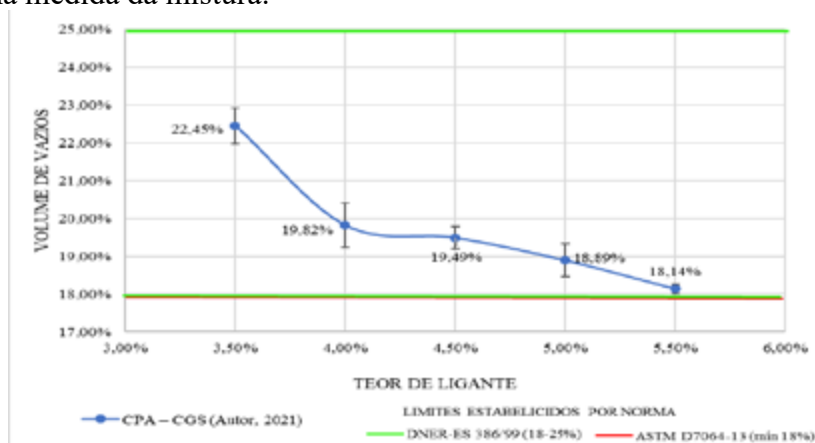
Para determinação do teor de projeto de ligante, foram dosadas e compactadas no CGS misturas em cinco teores distintos, 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%, a fim de analisar dentre os resultados de volume de vazios, cântabro e RT, a mistura que apresentou melhor desempenho com relação aos limites estabelecidos pela DNIT-ES 386/99. Em seguida, após definição do teor de ligante de projeto, realizou-se a caracterização mecânica e hidráulica da mistura CPA com o teor de projeto.

Determinação Do Volume De Vazios

Com base nos valores de densidade aparente e da densidade máxima das misturas, obtidos pelos métodos estabelecidos na especificação de serviço DNIT 117/94 no ensaio Rice, respectivamente, tornou-se possível calcular por meio da equação 1, o volume de vazios das misturas para cada teor de ligante e assim traçar o gráfico (Figura 3) volume de vazios *versus* teor de ligantes para a determinação de quais misturas apresentavam-se dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira DNIT-ES 386 (1999).

$$V_v(\%) = 100 * \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \quad (1)$$

Onde: V_v : índice de vazios (%); G_{mb} : densidade aparente da mistura compactada; G_{mm} : densidade máxima medida da mistura.





DOI: 10.29327/1430212.49-25

UTILIZAÇÃO DO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE® (CGS) NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)

Figura 3. Gráfico de volume de vazios *versus* teor de ligante.

Como pode-se perceber pelo gráfico da Figura 3, todas as misturas CPA compactadas pelo CGS encontraram-se dentro dos limites estabelecidos pelas normas DNIT-ES 386/99 (18-25%) e ASTM D7064-21 (>18%), entre elas os teores de 3,5%, 4,0% e 4,5% apresentaram-se melhor distribuídos dentro dos limites. Para o teor de 4,5% o autor Schneider (2016) apresentou um volume de vazios de 19,78% próximo ao desta pesquisa.

Segundo West e Morre (2006) quando comparadas à compactação CGS, amostras compactadas pelo método Marshall apresentam maior variabilidade nos resultados. Para misturas porosas tipo CPA, compactadas por impacto, espera-se que os volumes de vazios sejam ligeiramente menores aos encontrados para misturas com mesma composição granulométrica e mesmo teor de ligante compactadas por amassamento, devido a eventuais fraturas do esqueleto granular da mistura. Essa tendência ocorre por se tratar de uma mistura que apresenta um maior contato agregado-agregado. Na compactação por amassamento esses agregados são acomodados evitando essas fraturas que são mais comuns devido aos impactos da compactação Marshall. Garcia (2017) resalta ainda que para misturas drenantes compactadas no CGS o volume de vazios tende a estabilizar-se após 100 giros.

Determinação Do Desgaste Por Abrasão - Cântabro

Os resultados do ensaio de desgaste cântabro para todos os teores estão apresentados no Figura 4.

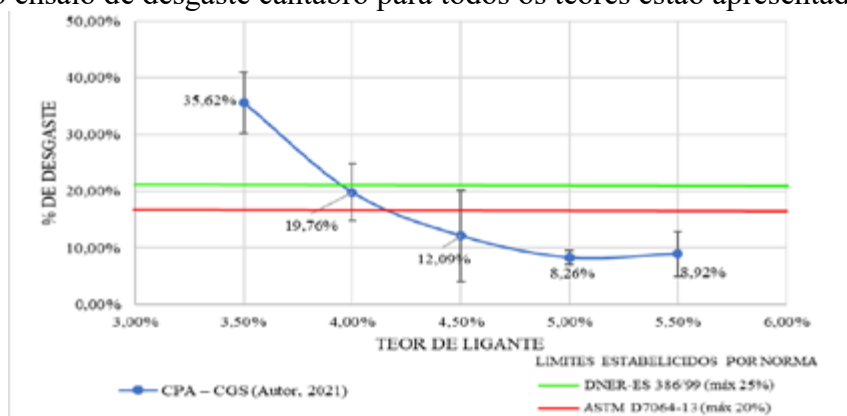


Figura 4. Gráfico % de desgaste versus teor de ligante.

Segundo a especificação 386 de 1999 do DNIT, o limite máximo de desgaste pelo ensaio de cântabro para uma mistura CPA é de 25%, enquanto que para a norma americana o limite aceitável é de 20%. Como pode-se perceber na análise da Figura 3, apenas as misturas com teores inferiores a 3,5% ultrapassaram esses limites, e a mistura com menor porcentagem de desgaste foi a com teor de 5,0% de ligante.

Os resultados obtidos apresentam uma tendência à linearidade, mostrando que quanto maior o teor de ligante, menor tende a ser o desgaste da mistura, fato relacionado à propriedade ressaltada por Bernucci *et al.* (2022) do ligante de ser um adesivo termoviscoplastico. Por tanto, quanto maior o teor de ligante maior adesão terá a mistura e mais resistirá ao desgaste. Meurer Filho (2001) concluiu que para uma determinada granulometria, o teor de ligante asfáltico influi no comportamento das misturas drenantes. O autor comprovou em suas análises que para teores de



ligante crescentes as perdas no ensaio Cântabro são decrescentes, comportamento comprovado no ensaio realizado nesta pesquisa.

Resistência À Tração Indireta Por Compressão Diametral

O gráfico apresentado na Figura 5 apresenta as resistências obtidas por meio do ensaio resistência à tração indireta por compressão diametral.

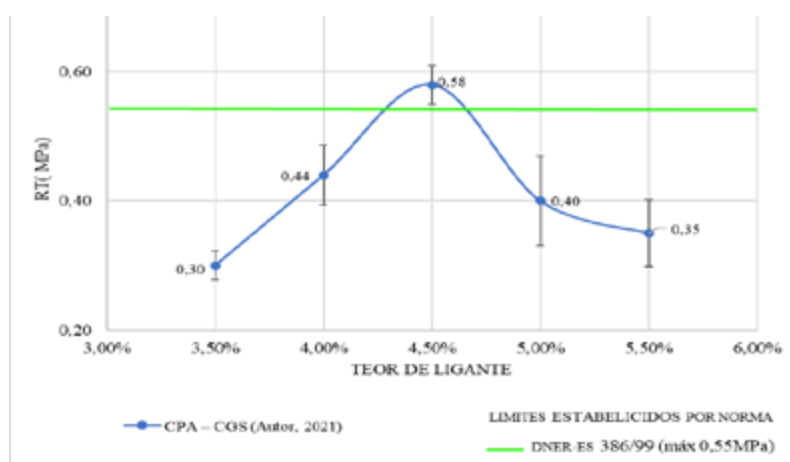


Figura 5. Gráfico da resistência a tração versus teor de ligante.

Para análise de qual mistura atendeu aos parâmetros estabelecidos para mistura do tipo CPA, quanto à resistência a compressão, foi levado em consideração o limite estabelecido na DNIT-ES 386 (1999), tendo em vista que a norma americana não apresenta análises ou limites quanto a resistência à tração indireta por compressão diametral. Como demonstrado na Figura 4, das misturas compactadas com CGS, apenas a mistura com 4,5% de ligante em sua composição atendeu a condição mínima exigida por norma que é 0,55 MPa.

Os resultados encontrados pelo autor Schneider (2016), que aplicou uma compactação Marshall para uma camada porosa de atrito, demonstram valores bem superiores para o ensaio de RT, acima de 0,78 MPa, aos apresentados por esta pesquisa que utilizou o compactador CGS. Entretanto outros fatores além do método de compactação podem estar diretamente relacionados a essa diferença, entre eles a idade dos corpos de prova que se apresentariam mais rígidos ao rompimento, com o passar dos dias e as características dos materiais utilizados para dosagem, principalmente os agregados.

Teor De Projeto De Ligante

Com base nos resultados obtidos pelos ensaios anteriormente descritos, determinou-se que para essa pesquisa seriam utilizadas misturas com teor de 4,5% de ligante, tendo em vista que esse teor apresentou resultados dentro dos limites estabelecidos pelas normas brasileira e americana. O teor de 4,5% de ligante foi o mesmo teor determinado por Schneider (2016) em sua pesquisa de dosagem de uma camada CPA seguindo a metodologia convencional brasileira de compactação.

Caracterização Da Mistura Com Teor De Projeto De Ligante



DOI: 10.29327/1430212.49-25

UTILIZAÇÃO DO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE® (CGS)
NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)

A partir da determinação do teor de projeto de 4,5% de ligante, foram compactados no CGS os corpos de prova para realização da caracterização da mistura, por meio dos ensaios estabelecidos pela norma americana de misturas abertas, como a CPA, ASTM D7064 (2021). A caracterização buscou verificar se o teor escolhido por meio dos parâmetros brasileiros atende também a norma americana que faz uso na compactação CGS. Os resultados apresentados foram obtidos pela média de valores de três corpos de prova para os ensaios de volume de vazios, cântabro, resistência a tração a compressão diametral, escorrimento, módulo de resiliência, Lottman e vazios comunicantes estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultado dos ensaios de caracterização da mistura.

Ensaio	Limites		CPA (4,5% De Ligante)
	DNIT-ES 386/99	ASTM D7064-21	
Volume de vazios (%)	18-25	18 (mín)	19,49
Desgaste por abrasão (%)	25 (máx)	20 (máx)	12,09
Resistencia à tração (MPa)	0,55 (mín)	-	0,58
Escorrimento (%)	0,3 (máx)	0,3 (máx)	0,16
Módulo de resiliência (MPa)	-	-	3071,5
Lottman (%)	80 (mín)	80 (mín)	82,14
Vazios comunicantes (%)	-	-	12,6

Como pode-se observar na Tabela 5, todos os resultados dos ensaios de caracterização da mistura com teor de 4,5% estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas, tanto brasileira (DNIT-ES 386, 1999), como americana (ASTM D7064, 2021).

Para o ensaio de volume de vazios, a mistura com teor de projeto de ligante apresentou uma porcentagem satisfatória de 19,49%, estando próximo a média do intervalo determinado pela DNIT-ES 386 (1999), garantindo a capacidade drenante do pavimento. O resultado determinado nesta pesquisa também é próximo ao encontrado na literatura, em Schneider (2016) que dosou a CPA pela metodologia convencional de compactação, o volume de vazios encontrado foi de 19,78% para a mistura com 4,5% de ligante.

No ensaio de desgaste por abrasão – cântabro, o resultado de 12,09% está dentro dos limites de 25% e 20% estabelecido pela especificação de serviço brasileira DNIT-ES 386/99 e americana ASTM D7064-21, respectivamente. Esse valor de desgaste mostra que a mistura CPA com um teor de ligante de 4,5% será resistente ao desgaste por abrasão causado pela fricção gerada entre pneu/pavimento.

O resultado obtido no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, de 0,58 MPa, apresentou-se dentro do limite mínimo aceitável para misturas do tipo CPA, de 0,55 MPa estabelecido pela DNIT-ES 386/99. No entanto, apesar de não ter função estrutural, que demandaria do revestimento valores de RT elevados, o resultado foi muito próximo desse limite, o uso do ligante 55/75-E pode ser um dos motivos de valores de RT não tão satisfatórios.

Schneider (2016), que apresenta no geral uma proposta de dosagem muito próxima a desta pesquisa, mas com compactação por impacto, obteve um resultado de 0,78MPa, para uma mistura com o mesmo teor de ligante (4,5%) e uma composição granulométrica similar. Em contrapartida a esta variação, pode-se relacionar além da compactação por CGS, a questão do tempo de descanso da mistura para realização do rompimento, o esqueleto mineral dos agregados e até mesmo a qualidade do ligante utilizado em ambas as pesquisas, mesmo ambas utilizando o Asfalto borracha. Porto (1999) define que para aplicação de pavimentos drenantes, como o CPA, recomenda-se que os ligantes asfálticos sejam modificados por polímeros, pois além de apresentarem melhor



adesividade, envolvem os agregados com filme de maior espessura, conferindo à mistura maior coesão, reduzindo problemas como a perda por escorrimento, justificando o uso do Asfalto borracha nessa pesquisa.

O ensaio de escorrimento da mistura comprovou a afirmativa de Porto (1999) ao apresentar uma média de 0,16% para as duas amostras ensaiadas, estando bem abaixo do limite estabelecido pela ASTM D6390 (2021) de 0,3%. Desta forma, pode-se constatar que a mistura se apresenta estável quando mantida a temperaturas elevadas, sendo essas temperaturas comparáveis com aquelas usadas durante a produção, estocagem, transporte e espalhamento. Isso garante que durante todo esse processo a massa de ligante não terá um alto desprendimento dos agregados, ou seja, as características esperadas em projeto serão conservadas.

Bernucci *et al.* (2022) citam que misturas asfálticas a 25°C, temperatura de realização do ensaio de módulo de resiliência, costumam apresentar valores típicos de módulo de resiliência (MR) entre 2.000 a 8.000 MPa. Em específico nada foi encontrado sobre módulo de resiliência para misturas do tipo CPA, então considerando a abordagem de Bernucci *et al.* (2022), pode-se afirmar que a mistura estudada nesta pesquisa apresentou valores esperados para esse ensaio. Para o teor de ligante de 4,5% escolhido nessa pesquisa o valor de MR de 3071,5 MPa foi próximo ao resultado determinado em ensaio por Schneider (2016), de 3415,83MPa para o mesmo teor em uma mistura tipo CPA.

Para o ensaio de dano por umidade induzida – Lottman, a mistura asfáltica com teor de ligante de 4,5% apresentou uma porcentagem de resistência retida à tração de 82,14%, enquadrando-se no limite mínimo de 80%, estabelecido pela AASHTO T 283 (1989). Este limite foi adotado para comparação tendo em vista que a norma brasileira DNIT 180 (2018) não apresenta limite mínimo, mas tem o procedimento de ensaio similar a norma americana.

No entanto, durante o procedimento de ensaio, o grau de saturação mínimo de 55%, estabelecido pela especificação brasileira não foi atingido, por se tratar de uma camada drenante. Lu; Lou e Harvey (2011) sugerem que esta metodologia de ensaio não é adequada para misturas asfálticas porosas, para os autores a redução da resistência após o condicionamento, pode estar relacionada ao enfraquecimento do ligante e/ou alteração no esqueleto mineral da mistura devido ao ciclo de congelamento e descongelamento em que são submetidas, visto que as misturas por eles estudadas não apresentaram nenhuma sensibilidade aos efeitos deletérios da água, que causam a perda de adesão entre o ligante asfáltico e os agregados.

Por fim, o ensaio de vazios comunicantes mostrou que a mistura apresenta uma porcentagem de 12,6% de vazios que se interconectam, essa porcentagem é responsável pela percolação de água no interior da camada de atrito porosa, assegurando a capacidade drenante do pavimento, característica típica da CPA.

Por meio da quantificação dos vazios comunicantes da mistura com 4,5% de ligante foi possível também verificar a porcentagem de vazios ineficazes da mistura, resultado da diferença entre o volume de vazios e os vazios comunicantes. Para essa pesquisa a porcentagem de vazios ineficazes é de 6,89%, esses vazios são responsáveis pelo armazenamento de água no interior CPA.

CONCLUSÕES

A realização deste estudo objetivou analisar a viabilidade do uso do compactador giratório SUPERPAVE® (CGS) na dosagem das camadas porosas de atrito (CPA). Para alcançar este objetivo foram observados e analisados os resultados quanto aos parâmetros volumétricos, hidráulicos e mecânicos da CPA. Assim, este estudo permitiu apontar as seguintes conclusões:



DOI: [10.29327/1430212.49-25](https://doi.org/10.29327/1430212.49-25)

**UTILIZAÇÃO DO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE® (CGS)
NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)**

- A porcentagem de volume de vazios para amostras compactadas por CGS apresentam valores satisfatórios e dentro dos limites estabelecidos pelas normas brasileira e americana, preservando a característica drenante da CPA.
- As misturas compactadas pelo CGS apresentaram uniformidade e coesão da mistura, apresentando-se pouco susceptíveis ao desgaste por abrasão.
- Quanto a resistência à tração por compressão diametral, mesmo não sendo uma camada com função estrutural, a mistura compactada pelo CGS apresentou resultado superior ao limite estabelecido pela norma brasileira.
- O índice de escorrimento, módulo de resiliência e resistência ao dano deletério da água estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas brasileira e americana, viabilizando o uso da CPA.
- O ensaio de vazios comunicantes comprovou que a compactação CGS preservou a característica drenante da CPA, onde a maioria dos vazios presentes na mistura são interconectados permitindo a percolação de água no interior da CPA.

Portanto, com base nas considerações feitas, pode-se concluir que a aplicação da compactação SUPERPAVE em uma mistura CPA dosada a partir dos parâmetros brasileiros não acarretou prejuízos às características volumétricas, mecânicas e hidráulicas da mistura.

Ao constatar a viabilidade de se realizar a compactação por amassamento em camadas porosas de atrito, garante-se aos estudos acadêmicos uma compactação mais próxima à realizada em campo, corroborando para mais um passo na evolução da utilização de mistura do tipo CPA no Brasil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALECRIM, C. M. C.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; PEIXOTO, N. G. M.; ALVES, A.; PINHEIRO, G. M. Avaliação do desempenho acústico e das características de superfície de camada porosa de atrito em meio urbano. Revista Transportes, Rio de Janeiro, 2022.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T283: Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. Anexo de normas traduzidas – Rede Temática de Ligante asfáltico – PETROBRÁS, 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM 2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), EUA, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for open-graded friction course (OGFC): D7064. West Conshohocken, PA, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for determination of draindown characteristics: D6390. West Conshohocken, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15184: Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16018: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. São Paulo, 2011.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. PETROBRÁS Asfaltos e ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. Rio de Janeiro, RJ; Brasil, 2022.

CERATTI, J. A. P., BERNUCCI, L. B., SOARES, J. B. (2015) Guia Técnico - Utilização de Ligantes em Serviço de Pavimentação. 1a ed. (ABEDA). 166p. Rio de Janeiro, RJ. Brasil.



CHU, L.; FWA, T.F. Functional sustainability of single- and double-layer porous asphalt pavements. *Constr. Build. Mater.* 197, 436–443, 2019.

DEL CARPIO, J. A. V. Uso de Pigmentos de Óxidos de Metais Mistos na Pavimentação para a Mitigação da Ilha de Calor Urbana. 437 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil – Ppgec da Universidade Federal de Santa Catarina., Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis, 2014

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT - ME 386/99. Pavimentação: pré-misturado a quente com asfalto polímero: camada porosa de atrito. Rio de Janeiro, 1999.

_____. DNIT 054/97: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

_____. DNIT 083/98: Agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNIT 383/99: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro. Rio de Janeiro, 1999.

_____. DNIT 136: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2018.

_____. DNIT – ME 035/1998. Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNIT– ME 131/2010 – Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola. Rio de Janeiro. 2010a.

_____. DNIT – ME 155/2010 – Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2010d.

_____. DNIT 413/19 – Pavimentação - Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas –Método de ensaio. Brasília, 2019.

_____. DNIT 411/19 – Pavimentação - Misturas asfálticas – Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. Brasília, 2021.

DOMINGOS, M. D. I.; PAMPLONA, T. F.; FAXINA, A. L.; GIGANTE, A. C. (2012). Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho. *TRANSPORTES*, 20(2). <https://doi.org/10.4237/transportes.v20i2.560>

KNABBEN, R.M. Desenvolvimento Do Trailer-Cpx e de uma Mistura Asfáltica de Baixa Emissão de Ruído Pneu-Pavimento. Tese de Doutorado. Universidade Federal De Santa Catarina – UFSC Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil – PPGEC. Florianópolis, 2017.

LU, Q.; LUO, S.; HARVEY, J. Compaction of Noise-Reducing Asphalt Mixes in the Laboratory. *Road Pavement And Material Characterization, Modeling, And Maintenance*, [s.l.], p.1-9, 2011. American Society of Civil Engineers.

MEURER FILHO, E. Estudos de granulometria para concretos asfálticos drenantes. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC: UFSC, 2001.

RIVERA, C.; CARO, S.; ARÁMBULA-MERCADO, E.; SÁNCHEZ, D. B. e KARKI, P. Evaluation of the use of a HiMA binder to extend the durability of porous friction courses (PFC). *International Journal of Pavement Engineering*, 2022.

SCHNEIDER, Daniel. Determinação Do Teor De Asfalto Para Enquadramento De Uma Mistura Asfáltica Aberta Como Camada Porosa De Atrito. 2016. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2016.

WANG, Z; LI, X. Mechanical Properties and Flame Retardancy of Rigid Polyurethane Foams Containing SiO₂ Nanospheres/Graphene Oxide Hybrid and Dimethyl Methylphosphonate. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 57 (9), 884–892, 2018.

WEST R.C.; MOORE J.R. Evaluating Georgia’s compaction requirements for Stone Matrix Asphalt Mixtures. Final Report. The Georgia Department of Transportation – DOT. Georgia, 2006.



AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM USO DE ESCÓRIA DE BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

Nayara Juliana Jargemboski Piazero Benkendorff¹; Breno Salgado Barra¹ Natan Assis Monteiro¹ Rafael Cristyan Fronza¹

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar misturas asfálticas densas do tipo Béton Bitumineux Semi-Grenus (BBSG), com a incorporação de escória de bateria de chumbo-ácido, a fim de verificar a viabilidade técnica deste rejeito industrial. A caracterização da escória foi realizada a partir de análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios- X (DRX), e espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX). Ainda, análises de lixiviação e pH foram realizadas, com o intuito de investigar a capacidade da escória de chumbo-ácido em causar impacto ao meio ambiente. A incorporação da escória de bateria de chumbo-ácido nas misturas asfálticas compreendeu a substituição de frações relacionadas à curva granulométrica de projeto, tendo sido testadas duas variações percentuais (7,0 % e 15,0 %), as quais foram comparadas às formulações de referência, previamente estudadas e compostas integralmente por granulares britados de maciço rochoso gnáissico. O ligante betuminoso foi classificado na faixa de penetração 30/45, em sua forma pura. As avaliações das formulações consideraram o escopo da metodologia francesa e abrangeram os aspectos relacionados a habilidade de compactação na prensa de compactação por cisalhamento giratório (PCG), resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 °C e à deformação permanente a 60 °C. Os resultados obtidos indicam que a incorporação da escória de chumbo-ácido estudada quando comparada às formulações de referência, apresentam menor habilidade de compactação, aporte de maiores teores de ligante nas dosagens. Em contrapartida, aspectos como a boa resistência à ação deletéria da água e, resultados de resistência à deformação permanente compatíveis com as classes normativas das formulações do tipo BBSG.

PALAVRAS-CHAVE: Escória de chumbo-ácido; metodologia francesa; misturas asfálticas densas.

ABSTRACT

The main objective of this work is to evaluate dense asphalt mixtures of the Béton Bitumineux Semi-Grenus (BBSG) type, with the incorporation of lead-acid battery slag, in order to verify the technical feasibility of this industrial waste. The slag was characterized using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and X-ray fluorescence spectrometry (XRF). Furthermore, leaching and pH analyzes were carried out, with the aim of investigating the ability of lead-acid slag to cause an impact on the environment. The incorporation of lead-acid battery slag into asphalt mixtures included the replacement of fractions related to the project granulometric curve, with two percentage variations being tested (7.0% and 15.0%), which were compared to the formulations of reference, previously studied and composed entirely of crushed granular gneiss rock mass. The bituminous binder was classified in the 30/45 penetration range, in its pure form. The evaluations of the formulations considered the scope of the French methodology and covered aspects related to the ability to compact in the rotary shear compaction press (PCG), resistance to the harmful action of water in the Duriez test at 18 °C and to permanent deformation at 60 °C. The results obtained indicate that the incorporation of the lead-acid slag studied, when compared to the reference formulations, has a lower compaction ability and provides higher levels of binder in the dosages. On the other hand, aspects such as good resistance to the harmful action of water and results in resistance to permanent deformation compatible with the normative classes of BBSG type formulations.

KEY WORDS: Lead-acid slag; French methodology; dense asphalt mixtures.

¹ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: nayara.jargemboski@gmail.com; breno.barra@ufsc.br; natan.mon2@gmail.com; rafael.c.fronza@gmail.com



INTRODUÇÃO

Com o objetivo de reduzir custos e manutenção e, ainda, mitigar a exploração dos materiais convencionais, recursos naturais não renováveis, normalmente usados nessas estruturas, a literatura cita diversos estudos relacionados à utilização de diferentes materiais, provenientes de processos industriais. No caso das baterias de chumbo-ácido a reciclagem direta é a maneira mais eficaz e econômica de recuperar matéria prima e reinserir materiais em fim de vida a cadeia produtiva, isso por que a quantidade substancial de baterias em desuso é um motivo de preocupação ambiental, mas também uma oportunidade econômica (GUPTA et al., 2024; TORRES et al., 2019; PEREIRA et al., 2019; YAN XU e YOU 2015; SPECHT 2012; BARDINI et al., 2012).

À medida que a produção mundial de minério de chumbo primário continua a diminuir, a reciclagem de Chumbo (Pb) de baterias chumbo-ácido exaustas torna-se uma medida muito importante para lidar com a escassez de recursos de chumbo, garantindo assim a circulação estável da indústria de baterias chumbo-ácido (TIAN et al., 2017).

A preocupação mundial frente a esta situação é crescente, em razão do aumento da produção de resíduos concomitante ao seu gerenciamento inadequado, bem como à falta de áreas para disposição final destes.

Nesse contexto, a motivação desta pesquisa consiste em formular, avaliar o comportamento e, a viabilidade técnica do resíduo oriundo de escória de bateria de chumbo-ácido, quando utilizado composição de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), em substituição parcial às frações granulares britadas de rocha gnáissica, visando reduzir os impactos ambientais atrelados ao processo de estocagem em aterros sanitários, contribuindo para a mitigar danos sobre a saúde do ser humano e do meio ambiente.

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE ESCÓRIA DE BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

O censo 2022 divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) registrou que a frota nacional foi de 45.029.257, em 2006, para 115.116.532 em 2022, um salto de 155,65% em 16 anos, na média, 4,3 milhões de veículos por ano, o que representa um veículo automotivo para cada quatro habitantes. O Ministério do Meio Ambiente aponta que atualmente estima-se que cerca de 90 % do consumo nacional de chumbo provenha de atividades de reciclagem (MMA, 2022).

Consumidores de chumbo por ordem decrescente de importância são: os fabricantes de baterias ácidas automotivas e industriais, responsáveis por 95,24 % do consumo do chumbo metálico, e os de óxidos, 4,76 %, respectivamente. O processo de produção de chumbo secundário, obtido a partir da reciclagem de baterias de chumbo-ácido gera uma grande quantidade de resíduo sólido durante a etapa de fundição, que é quando o chumbo é recuperado na sua forma metálica. Este resíduo é chamado de escória, a qual é proveniente de forno de fundição de chumbo, sendo constituída basicamente de ferro e com concentrações menores de enxofre, sódio e chumbo (SILVA e TEIXEIRA, 2020).

A redução da geração de resíduos sólidos é uma meta comum para as indústrias siderúrgicas. No entanto, nos diversos processos produtivos nem sempre é possível atingir a redução total. Logo, estudos que se destinem a investigar a possibilidade do aproveitamento de resíduos siderúrgicos no segmento da pavimentação é de grande importância, pois permite a sua utilização em larga escala.



DOI: 10.29327/1430212.49-51

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM USO DE ESCÓRIA DE BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

Neste contexto, o aproveitamento da escória de bateria de chumbo-ácido, contribui para o estabelecimento de indicadores positivos de desenvolvimento sustentável, ao reduzir tanto o uso de granulares britados naturais, com o consumo de energia e transporte associados, quanto o descarte de resíduos em aterros sanitários (KHALED et al., 2021).

A reciclagem do chumbo desempenha um papel fundamental na indústria, permitindo a reutilização dos materiais e reduzindo a dependência das reservas naturais. Segundo dados do International Lead and Zinc Study Group (ILZSG), em 2020, a taxa global de reciclagem de chumbo foi de aproximadamente 82 %. Isso significa que a maioria do chumbo consumido no mundo é proveniente de fontes recicladas.

Observando-se a Tabela 1, percebe-se a importância da produção de chumbo secundário no Brasil que, graças a várias recicladoras instaladas por todo país são responsáveis pelo abastecendo do mercado interno (ANM, 2020):

Tabela 1. Balanço nacional da produção secundária de minério refinado de chumbo (ANM, 2020).

Ano	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Metal secundário (t)	165.397	151.964	160.393	152.161	156.186	166.695	158.972	145.882	170.773

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

As frações granulares desta pesquisa foram oriundas de britagem de maciço rochoso gnáissico, coletadas em jazida localizada na região metropolitana de Joinville/SC. Os ensaios de caracterização foram executados conforme as normas vigentes no Brasil (Tabela 2)

Tabela 2. Caracterização das frações granulares (Adaptado de PERSIKE, 2023).

ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES	NORMA
Abrasão Los Angeles	13,4%	≤ 50%	DNER-ME 35/98
Durabilidade	3,1%	≤ 12%	DNIT-ME 446/2024
Índice de forma	0,65	≥ 0,5	ABNT NBR 7809/2006
Adesividade	Má	-	DNER-ME 78/94
Equivalente de areia	78%	-	DNER-ME 54/97
Teor de material pulverulento	0,1%	≤ 1,0%	DNER-ME 266/97
Absorção	0,3%	-	DNIT-ME 413/2021
Massa específica aparente	2,768 g/cm ³	-	DNIT-ME 413/2021
Massa específica real	2,812 g/cm ³	-	DNIT-ME 413/2021

A escória de bateria de chumbo-ácido foi fornecida pela empresa Baterias Pioneiro, situada na cidade de Treze Tílias/SC. As análises química, física e mineralógica das amostras de escória de chumbo-ácido foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Micropartículas (LACAMI), localizado em Criciúma/SC.

Com o intuito de verificar quais frações da escória de chumbo-ácido possuíam maior representatividade percentual, foi realizada a análise granulométrica das amostras obtidas, em comparação com o pó de pedra e o resíduo de construção e demolição (RCD) utilizados por Persike (2023). Como resultado, verificou-se que o montante passante na abertura de peneira 0,3 mm



Nayara Juliana Jargemboski Piazero Benkendorff,
Breno Salgado Barra,
Natan Assis Monteiro,
Rafael Cristyan Fronza

compreendia quantidades propícias para substituições em larga escala de escória de chumbo-ácido na produção de misturas asfálticas (Figura 1).

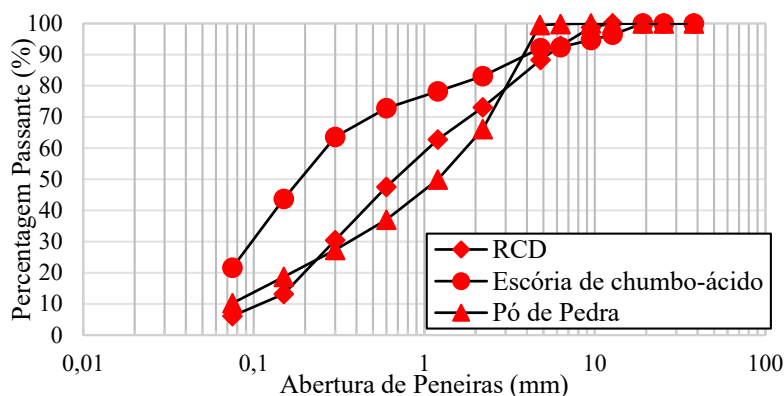


Figura 1. Distribuição granulométrica do pó de pedra, RCD e escória de chumbo-ácido (Adaptado de PERSIKE, 2023).

A composição química por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX), foi realizada após o teste de perda ao fogo (PF), seguindo a Norma ASTM D7348-07 (2007), a fim de se eliminar os materiais orgânicos e água de constituição presentes no material, conforme resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Distribuição percentual dos óxidos componentes da escória de chumbo-ácido (JARGEMBOSKI, 2024) comparada à do pó de pedra (CLARA, 2020).

Fíleres (%Massa)	Elementos														
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	PbO	SO ₃	MnO	ZrO ₂	V ₂ O ₅	SrO	ZnO	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O
Escória de chumbo-ácido	3,149	40,424	-	9,224	-	0,398	3,088	34,511	0,380	0,028	-	0,033	1,057	0,179	-
Pó de pedra	53,602	14,505	10,928	8,080	3,26	2,576	0,013	0,435	0,033	0,111	0,103	-	0,062	0,049	0,639

Quanto à escória de chumbo-ácido, verifica-se que o óxido Férreo (Fe₂O₃) é predominante na composição, pois durante o processo pirometalúrgico utilizado na reciclagem da escória primária, sobretudo na recuperação do Chumbo (Pb), para que ocorra a redução da sucata metálica a chumbo metálico, são adicionados Carbono (C) e Ferro (Fe) como agentes redutores do potencial oxidante dos elementos anódicos nas reações químicas, gerando a escória secundária (CHEN et al., 2023; MACHADO, 2002). Os demais elementos identificados em menor escala na Tabela 3, são substâncias inorgânicas secundárias presentes na constituição das baterias de chumbo-ácido, basicamente vinculadas às reações produtoras de óxidos. Desta forma, depreende-se que a escória de chumbo-ácido estudada nesta pesquisa possui característica fortemente eletropositiva, pois somando os percentuais apenas dos elementos Fe₂O₃, SO₃, CaO e PbO, atinge-se 87,27 % da composição da amostra, e incorporando os percentuais correspondentes aos demais elementos catódicos secundários, supera-se a marca de 90,0 %, assemelhando-se bastante à quantificação percentual dos elementos nas análises de EDS no MEV. Quanto ao pó de pedra, tem-se que a concentração de SiO₂ é da ordem de 50,00 %. Nestes termos, o teor de SiO₂ do pó de pedra é considerado elevado, se comparado ao da escória, caracterizando-o como um material de alta eletronegatividade, fator que propicia baixa adesividade ao ligante betuminoso, condição oposta à tendência apresentada pela escória.

No que diz respeito à análise morfológica das partículas de escória de chumbo-ácido foi aplicada à



DOI: 10.29327/1430212.49-51

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM USO DE ESCÓRIA DE BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (Figura 2).

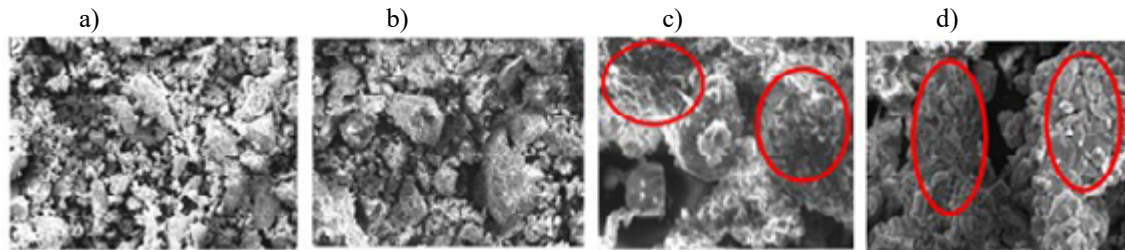


Figura 2. Análise das amostras de escória de chumbo-ácido com ampliação de: (a) 500x, (b) 1000x, (c) 3000x e (d) 3000x (JARGEMBOSKI, 2024).

Quanto à escamosidade e porosidade mencionadas, tem-se que estão relacionadas diretamente ao processo de reciclagem da escória de chumbo-ácido, pois o procedimento pirometalúrgico realizado nas indústrias ao utilizar fornos tipos cuba, revérberos e rotativos, por exemplo, compreende temperaturas que atingem a escala de 800 °C a 1200 °C (ZHAO et al., 2022; ANDRADE e BERNADEZ, 2011; CHACÓN-SANHUEZA e FONTANETTI, 2006). Assim, durante o período de resfriamento da escória, o aspecto escamoso das partículas é formado durante o escoamento das fases metálicas, em conjunto com os resíduos de Chumbo esponjoso (Pb) provenientes do eletrodo anódico das baterias de chumbo-ácido, enquanto a porosidade é oriunda de diversos fatores, podendo-se destacar a liberação dos gases nas reações exotérmicas e a acomodação aleatória dos particulados resultantes (WAN et al., 2021; ANDRADE et al., 2014).

A composição mineralógica das amostras de escória de chumbo-ácido foi determinada por difratometria de Raios-X (DRX), e a identificação das fases (Figura 3), procedida pela comparação dos resultados obtidos em relação aos difratogramas contidos no banco de dados *Crystallography Open Database* do LACAMI.

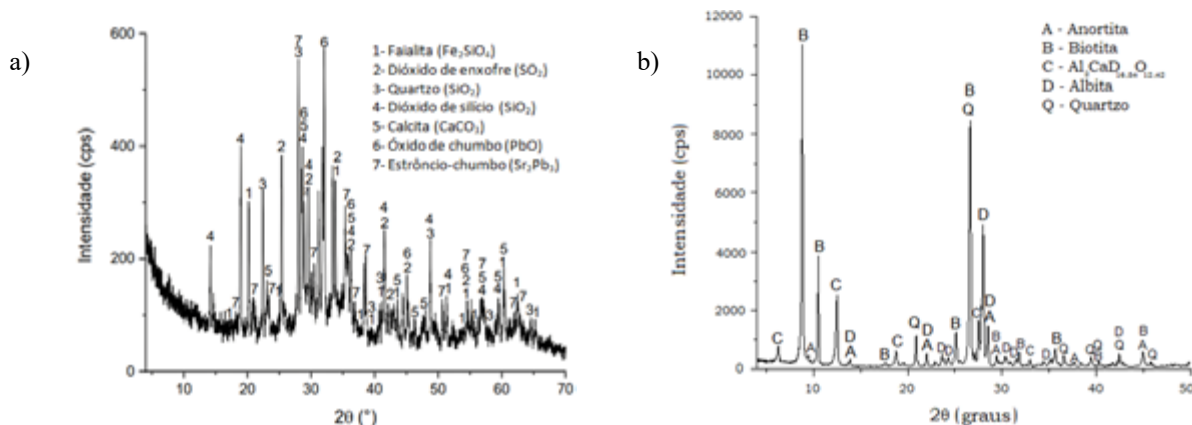


Figura 3. Difratograma da (a) escória de chumbo-ácido (JARGEMBOSKI, 2024) e do (b) pó de pedra, (BARRA et al. 2021).

Comparando a difratometria da escória de chumbo-ácido (Figura 3a) com a do pó e pedra (Figura 3b), é notável a presença elevada de picos sucessivos das fases de óxido de Chumbo (PbO) e liga de Estrôncio-Chumbo (Sr_2Pb_3) são as que apresentam os maiores picos de difração, devido ao Pb ser o elemento principal da composição das placas e eletrodos constituintes das baterias de chumbo-ácido.



Nayara Juliana Jargemboski Piazero Benkendorff,
Breno Salgado Barra,
Natan Assis Monteiro,
Rafael Cristyan Fronza

no primeiro, enquanto o segundo indica picos referentes às presenças dos minerais anortita, biotita, albita e quartzo, corroborando as análises de FRX.

O ensaio de lixiviação simula a condição de um resíduo quando submetido à ação intempérica, determinando a capacidade de transferência para o solo de substâncias orgânicas e inorgânicas que o constitui. O processo de transferência se dá pela sua dissolução em um meio extrator. O ensaio consiste do contato do resíduo em estudo com uma solução lixivante até que se atinja uma condição estável, ou seja, sem que haja a percepção de modificações da textura ou coloração. Após este período, a solução formada pelo contato das fases é filtrada e o líquido obtido é analisado, sendo denominado de extrato lixiviado. Nesta pesquisa, os ensaios de lixiviação para determinação da toxicidade da escória de chumbo-ácido foram realizados conforme a norma ABNT NBR 10005 (2004). O pH dos resíduos de escória de chumbo-ácido foi determinado de acordo com o descrito no item 4.2.1.2 da norma ABNT NBR 10004 (2004).

O ligante betuminoso utilizado foi o 30/45 classificado por penetração, em sua forma pura, proveniente de refinaria localizada em Paulínia/SP. As características técnicas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de caracterização do ligante betuminoso 30/45 (REPLAN, 2018).

Características	Método	Resultado	Especificação	Unidade
Penetração	D 5	34	30 a 45	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D 36	53,5	52 mín.	°C
Ductilidade a 25 °C	D 113	>150	60 mín.	% massa
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,9	99,5 mín.	%
Ponto de fulgor	D 92	352	235 mín.	°C
Índice de suscetibilidade térmica	X 18	-1,2	-1,5 a 0,7	-
Densidade relativa da amostra a 20 °C	D 70	1,01	-	°C
Aquecimento a 177 °C	X 215	Não espuma	Não espuma	°C

Pela Tabela 4 é possível constatar que o índice de suscetibilidade térmica (IP) possui um valor muito próximo ao limite mínimo normativo, indicando forte termosusceptibilidade a elevadas temperaturas. Os dados de viscosidade fornecidos pela refinaria, a partir do método Saybolt-Furol (DNER-ME 004, 1994), indicaram a temperatura adequada para usinagem do ligante em 155 °C, enquanto a de compactação da mistura asfáltica em 145 °C o que permitiu determinar as temperaturas de compactação em 145 °C e de usinagem em 155 °C, além do aquecimento dos granulares em 168 °C, ou seja, 13 °C acima da temperatura de usinagem, estando em conformidade com o intervalo de 10 °C a 15 °C normalmente praticado (BERNUCCI et al., 2022).

Métodos

Ensaio Laboratoriais

Para a execução dos ensaios laboratoriais, aplicaram-se os níveis avaliativos sequenciais e eliminatórios 1 e 2 da metodologia francesa (MANUEL LPC, 2007), compreendendo os parâmetros de: (nível 1) habilidade de compactação com a Prensa de Compactação por cisalhamento Giratório (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019) e resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 °C (AFNOR NF EN 12697-12, 2018), e; (nível 2) deformação permanente a 60 °C (AFNOR NF



DOI: 10.29327/1430212.49-51

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM USO DE ESCÓRIA DE BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

EN 12697-22, 2020). Foram consideradas para cada teor de ligante as quantidades de 3, 12 e 2 corpos de prova, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta os limites normativos para cada classe de misturas do tipo BBSG (1, 2 e 3), em que a 3 é a mais nobre, enquanto a Figura 4 ilustra a sequência de testes executados durante a campanha experimental.

Tabela 5. Limites normativos considerados nos ensaios (PERSIKE, 2023).

Ensaio	Norma	Classe da Mistura BBSG	Limites Normativos
PCG	AFNOR NF EN 12697-31 (2019)	1, 2 e 3	$\%V_{\min} \geq 4,0\%$ e $\%V_{\max} \leq 9,0\%$ a 80 giros
Duriez	AFNOR NF EN 12697-12 (2018)	1, 2 e 3	$r/R \geq 0,70$
Deformação Permanente a 60 °C	AFNOR NF EN 12697-22 (2020)	1	$7,5\% < \% \leq 10,0\%$, após 30.000 ciclos
		2	$5,0\% < \% \leq 7,50\%$, após 30.000 ciclos
		3	$\% \leq 5,0\%$, após 30.000 ciclos

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Habilidade de Compactação na PCG

Os resultados obtidos nos ensaios de habilidade de compactação com o uso da PCG são apresentados na Figura 5, indicando o cenário geral da evolução do volume de vazios (%V) no transcurso dos giros executados pela PCG, com aplicação de esforços de compressão axiais e cisalhantes sobre as amostras.

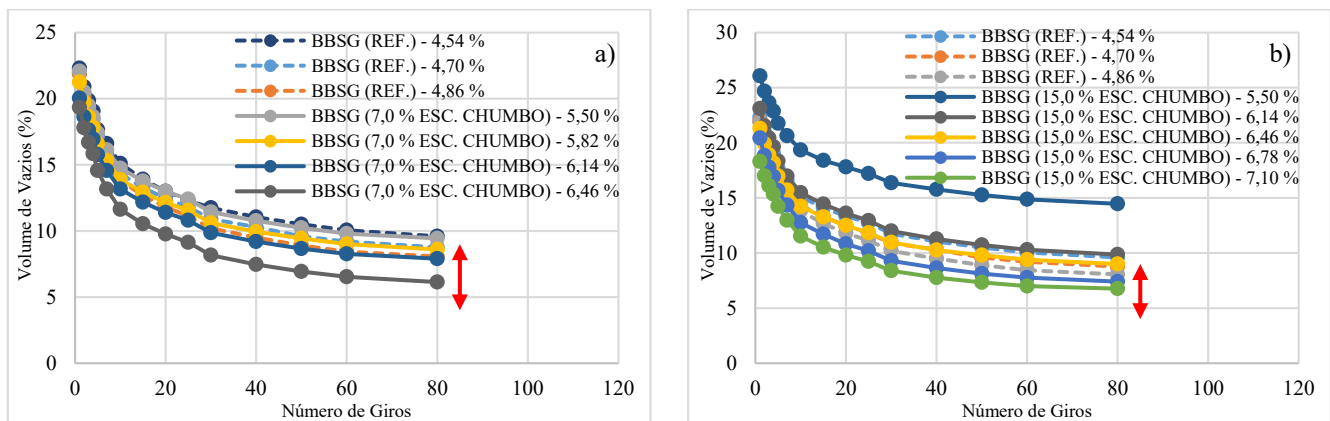


Figura 4. Habilidade de compactação das misturas: a) referência e com 7,0 % de escória de chumbo-ácido; b) referência e com 15,0 % de escória de chumbo-ácido (JARGEMBOSKI, 2024).

É possível observar em todos os cenários comparativos com a mistura asfáltica de referência, que as incorporações de escória de chumbo-ácido necessitaram de maiores aportes de ligante betuminoso nas dosagens, implicando em menores volumes de vazios para os mesmos 80 giros estabelecidos normativamente.

Esta tendência confirma a condição mencionada quanto à análise da textura das partículas de escória de chumbo-ácido e pó de pedra, em que o primeiro possui em relação às amostras de 7,0 %, a escória de chumbo-ácido apresenta área superficial 2,16 vezes maior que a do pó de pedra, além de volume



Nayara Juliana Jargemboski Piazero Benkendorff,
Breno Salgado Barra,
Natan Assis Monteiro,
Rafael Cristyan Fronza

total e diâmetro médio de poros 3,31 e 1,54 vezes maiores, no que diz respeito às amostras de 15,0 %, tem-se que a escória de chumbo-ácido apresenta área superficial 9,34 vezes maior que a do pó de pedra, com um volume total de poros 3,97 maiores. Logo, isto acarreta em menor área ocupada por de unidade de peso a ser preenchida, dificultando o envolvimento pelo ligante betuminoso, devido ter maior potencial de absorção intragranular, demandando teores de ligante superiores para que alcance o mesmo êxito de trabalhabilidade das misturas de referência.

Resistência à ação deletéria da água

Para a realização do ensaio de Duriez a 18 °C, procedeu-se os testes apenas com as formulações aprovadas no ensaio da PCG. A Figura 5 ilustra os resultados obtidos.

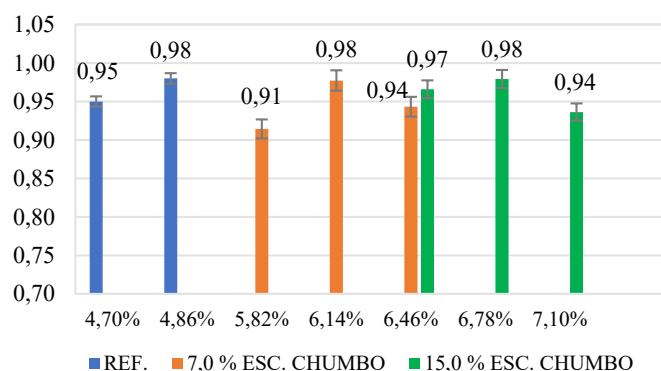


Figura 5. Relação r/R obtidas no ensaio de Duriez (JARGEMBOSKI, 2024).

Conforme discorrido no tópico sobre a caracterização dos materiais com base nas análises de FRX, em que os percentuais de elementos eletropositivos da escória de chumbo-ácido superam a marca de 90,0 %, enquanto o pó de pedra possui cerca de 50,0 % da composição característica eletronegativa. Logo, mesmo com maior porosidade que o pó de pedra, a escória permite a formação de um dipolo com os granulares gnáissicos e com o ligante betuminoso, viabilizando atração elétrica entre os compostos e, conseqüentemente, contribuindo para a obtenção de boa adesão do conjunto formulado. É possível depreender que a incorporação da escória de chumbo-ácido não implicou em redução da resistência à ação deletéria da água, quando comparada às misturas asfálticas de referência. Tanto é fato, que todos os resultados atingiram patamares acima de 90,0 %, significando excelente desempenho.

Deformação Permanente

Para esta etapa de avaliação, foram testadas as formulações aprovadas no conjunto dos ensaios de PCG e Duriez a 18 °C, sendo os resultados ilustrados na Figura 6.



DOI: 10.29327/1430212.49-51

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM USO DE ESCÓRIA DE BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

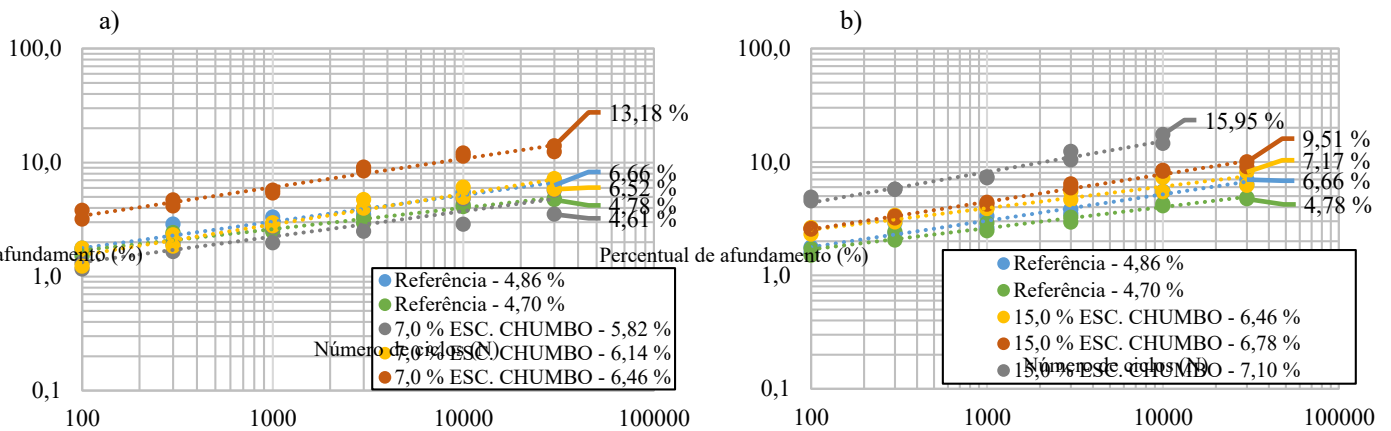


Figura 6. Evolução do afundamento na trilha de rodas das misturas: a) referência e com 7,0 % de escória de chumbo-ácido; b) referência e com 15,0 % de escória de chumbo-ácido (JARGEMBOSKI, 2024).

No que diz respeito às formulações com 7,0 % de incorporação da escória de chumbo-ácido, tem-se que a dosagem com 5,82 % de ligante betuminoso também se enquadrou na classe 3, após apresentar afundamento de 4,78 % na trilha de roda. Todavia, como a porosidade dos grãos da escória de chumbo-ácido é uma característica muito presente e variada, conforme abordado características distintas neste aspecto em cada placa testada, acarretando uma variabilidade nos resultados obtidos do mesmo par de placas testado. Para a dosagem com 6,14 % de ligante betuminoso, o percentual de afundamento médio foi de 6,52 %, valendo as mesmas explicações quanto à variação dos resultados obtidos para o teor de 5,82 % após 30.000 ciclos. A dosagem de 6,46 % foi reprovada, devido ter alcançado afundamento médio de 13,18 %, ultrapassando o limite máximo de 10,0 % previsto para a classe 1 das misturas asfálticas BBSG.

Para as misturas asfálticas com 15,0 % de escória de chumbo-ácido, tem-se que a dosagem com 6,46 % de ligante betuminoso enquadrou-se na classe 2, e com 6,78 % na classe 1, a menos nobre das formulações BBSG, pois alcançaram afundamentos médios na trilha de roda em 7,17 % e 9,51 %, respectivamente. A dosagem com 7,10 % foi reprovada pelos mesmos motivos discorridos para a formulação com 6,46 % de teor de ligante betuminoso referente aos 7,0 % de incorporação da escória de chumbo-ácido.

Ensaio de lixiviação e análise de pH

A partir dos resultados obtidos compreendeu a lixiviação de metais pesados contidos nas amostras de escória de chumbo-ácido, principalmente o Chumbo (Pb), a quantidade de Pb lixiviado de ambas as amostras é 200 vezes superior ao limite permitido pelo Anexo F da norma ABNT NBR 10004 (2004), demonstrando que o potencial lixiviador independeu da quantidade de escória incorporada nas formulações, fato que representa grave risco de impacto e dano ambiental, e ratifica a classificação deste resíduo como Classe I – Perigoso.

No âmbito prático, verifica-se então que a precipitação de chuvas recorrentes no campo, principalmente as de maior duração e intensidade, contribuirá diretamente para a lixiviação de



elementos tóxicos presentes na escória de chumbo-ácido, como Chumbo (Pb), causando penetração no solo e resultando assim em contaminação do meio ambiente.

Quanto ao resultado da análise de pH das misturas asfálticas com 7,0 % e 15,0 % de incorporação da escória de chumbo-ácido, tanto do resíduo (escória) quanto do extrato lixiviado, em que os resultados indicam o pH das amostras inferior a 7,0 em todos os casos testados, demonstrando que tanto após a geração no processo de reciclagem quanto após os ensaios de lixiviação, a escória possui característica ácida e corrosiva, com agravante para o extrato lixiviado, devi do ter apresentado os menores valores. Estes fatores ratificam os comentários já discorridos sobre os prejuízos à sanidade das partículas granulares rochosas e à diminuição da vida útil das misturas asfálticas.

CONCLUSÕES

A partir da campanha experimental realizada, verificou-se que a partir das características da escória de chumbo-ácido estudada, tem-se que pelo fato da escória de chumbo-ácido apresentar superfície específica e porosidade que pode chegar a nove e quase quatro vezes maiores que a do pó de pedra, respectivamente, acarreta maior aporte de ligante betuminoso nas dosagens, bem como propicia menor resistência ao esforço de compressão e cisalhamento aplicado ao longo do processo de compactação, diminuindo a trabalhabilidade das formulações quando comparadas às misturas asfálticas de referência, em que pese disporem de partículas com macrotextura subangular e microtextura rugosa. Diminuindo a resistência aos esforços de compressão axial e de cisalhamento aplicados nos testes de habilidade de compactação, culminando com uma forte redução do teor de vazios, e maiores afundamentos na trilha de roda.

No que diz respeito à resistência à ação deletéria da água, é possível inferir que o elevado percentual de elementos eletropositivos constante na composição mineralógica da escória de chumbo-ácido (> 90,0 %), com destaque para o Ferro (Fe) (40,4 %), contribui para a formação de um dipolo propiciador de boa interação elétrica entre os compostos das misturas asfálticas, neste contexto influenciando na obtenção de boa resistência à ação deletéria da água, bem como aos esforços de compressão simples na determinação das relações r/R. Em contrapartida, verificou-se uma elevada taxa de lixiviação dos metais pesados contidos na escória de chumbo-ácido, sobretudo o Chumbo (Pb). Além disso, o pH obtido do extrato lixiviado abaixo de 7,0 para todos os percentuais incorporados nas formulações, ratificou a característica fortemente ácida e corrosiva deste material, indicando ser um potencial gerador de impacto e dano ao meio ambiente, caso não seja encapsulado de forma efetiva.

Dado o exposto, conclui-se que a utilização da escória de chumbo-ácido estudada apresentou maiores dificuldades operacionais nos aspectos de manipulação, insalubridade e conservação de equipamentos, quando comparada ao pó de pedra, devido à característica ácida e corrosiva de sua composição, exigindo dos envolvidos nos procedimentos muita atenção e cuidado, além de proteção reforçada durante o uso. Logo, em termos práticos, verifica-se que estes aspectos podem constituir em dificuldades para aceitação da indústria em utilizar o insumo em larga escala.

Quanto à concepção de misturas asfálticas densas do tipo BBSG, os resultados obtidos com a incorporação da escória de chumbo-ácido quando comparados aos resultados das formulações de referência, indicaram pouca viabilidade técnica em sua utilização, em razão da trabalhabilidade mais dificultosa nos procedimentos de usinagem, menor habilidade de compactação e maior dispêndio econômico de produção devido ao consumo de ligante betuminoso mais elevado demandado nas dosagens.



DOI: [10.29327/1430212.49-51](https://doi.org/10.29327/1430212.49-51)

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM USO DE ESCÓRIA DE BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

Recomenda-se também a continuidade desta pesquisa, porém, com a investigação de técnicas capazes de encapsular adequadamente o material, evitando a lixiviação, em consonância à utilização de ligantes betuminosos mais consistentes e modificados. Sugere-se também realizar uma análise da aplicação da escória de chumbo-ácido em outras camadas betuminosas (ligação, base e sub-base, por exemplo), com o intuito de proteger este material do ataque intempérico direto, verificando se esta condição propicia melhor resposta aos fenômenos de carbonatação e lixiviação de metais pesados, contribuindo para eliminar ou mitigar os riscos de contaminação ambiental.

REFERÊNCIAS

AFNOR NF EN 12697-12 (2018), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AFNOR NF EN 12697-22 (2020), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 22: Essai d'orniérage. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AFNOR NF EN 12697-31 (2019), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 31: Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

ANDRADE LIMA, L.R.P. DE; BERNARDEZ, L.A. (2011), Characterization of the Lead Smelter Slag in Santo Amaro, Bahia, Brazil. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 189, Issue 3, pp. 692-699, ISSN 0304-3894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.091>.

ANDRADE, M. B.; COSTA, W.; ANDRADE, A. V. C. (2014), Caracterização e Estudo da Lixiviação de Metais de Escórias Provenientes da Reciclagem de Baterias de Chumbo-Ácido. *Holos*, vol. 5, ISSN 1807-1600, pp. 361-371. DOI: 10.15628/holos.2014.2042.

ANM (2020), Agência Nacional de Mineração. *Anuário Mineral Brasileiro 2020: Principais Substâncias Metálicas*. Brasília.

ASTM D7348-07 (2007), Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues. American Association for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.

BARDINI, V. S. S.; KLINSKY, L. M. G.; JÚNIOR, J.L. F.; ROQUE, R. (2012). Influência do filer mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos. *Transportes*, 20 (3), 19-26. <https://doi.org/10.4237/transportes.v20i4.603>

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, G.L.M; CERATTI, P.J.A; SOARES, J.B. (2022). *Pavimentação asfáltica: Formação Básica para engenheiros*. 2. ed. 3. Reimpressão. Rio de Janeiro: PETROBRAS: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos (ABEDA).

CHACÓN-SANHUEZA, A. E.; FONTANETTI, A. R. (2006), Novos Processos de Reciclagem de Chumbo. *Revista Matéria*, vol. 11, nº 2, pp.146-154.

CHEN, D. T.; ROY, A.; LI, Y. Q.; BOGUSH, A.; AU, W. Y.; STEGEMANN, J. A. (2023), Speciation of toxic pollutants in Pb/Zn smelter slags by X-ray Absorption Spectroscopy in the context of the literature. *Journal of Hazardous Materials*, 132373, ISSN 0304-3894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132373>.

GUPTA, V. MAÇÃ; M. LI; W. CHEN, Z. (2024). Direct recycling industrialization of Li-ion batteries: The pre-processing barricade. *Next Energy*, Vol 2. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.nxener.2023.100091>.

IBGE (2022). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo 2022 Panorama*. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm_source=ibge&utm_medium=home&utm_campaign=portal> Acesso em: 22 de outubro de 2023.



Nayara Juliana Jargemboski Piazeria Benkendorff,
Breno Salgado Barra,
Natan Assis Monteiro,
Rafael Cristyan Fronza

ILZSG (2020), Lead and Zinc Study Group. An Analysis of Used Lead Acid Battery (ULAB) Trade and Related Regulations in North America. Disponível em: <http://www.ilzsg.org/ilzsgframe.htm>. Acesso em: 28 de maio de 2023.

KHALED E. HASSANA; MOHAMED I.E. ATTIAB; MURRAY REIDEC; MOHAMMED B. S. AL-KUWARID. (2021). Performance of steel slag aggregate in asphalt mixtures in a hot desert climate. *Case Studies in Construction Materials*, Vol 14, pp 1-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00534>.

MACHADO, I. P. (2002), Avaliação Ambiental do Processo de Reciclagem de Chumbo. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Campinas (UNICAMP), 116 p.

MANUEL LPC (2007). Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - LCPC. Paris, França.

MMA (2022), Ministério do Meio Ambiente. Brasil avança na reciclagem de baterias de chumbo-ácido. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/reciclagem-de-baterias-automotivas-atende-43-da-frota-brasileira>, última consulta em janeiro de 2024.

PEREIRA, A. G., SPINOLA, J. R., MONTEIRO, A. K. C., LACERDA, B. M., GUSMAO, F. S. GUSMAO. & FROTA, C. A. (2019). Mechanical behavior of asphaltic mixtures produced with spray graphite in high energy mill. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 9, 18-26. 10.9790/9622- 0911031826.

PERSIKE, T. (2023). Avaliação da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas com incorporação de resíduos de construção e demolição. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.

SILVA, B. C. E.; TEIXEIRA, J. A. de A. B. (2020). Chumbo. Disponível em: https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3981, última consulta em fevereiro de 2023.

SPECHT, L. P.; GRANICH, A.; PASCH, E.; BOEIRA, F. (2012). Estudo laboratorial de misturas asfálticas com adição de diferentes teores e tipos de cal. *Revista Estradas*, 17, 66-72.

TIAN, X., WU, Y., HOU, P., LIANG, S., QU, S., XU, M., ZUO, T. (2017). Environmental impact and economic assessment of secondary lead production: comparison of main spent lead-acid battery recycling processes in China. *J. Clean. Prod.* 144, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.171>.

TORRES, A. P., PEREIRA, I. N. A., SPINOLA, J. R., PEREIRA, A. G. & FROTA, C. A. Torres. (2019). Four-point bending mechanical behavior of aged asphalt mixtures containing charcoal. *International Journal for Innovation Education and Research*, 7, 460-472. 10.31686/ijer.Vol7.Iss10.1794

WAN, X.; TASKINEN, P.; SHI, J.; JOKILAAKSO, A. (2021), A Potential Industrial Waste–Waste Co-Treatment Process of Utilizing Waste SO₂ Gas and Residue Heat to Recover Co, Ni, and Cu from Copper Smelting Slag. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 414, 125541, ISSN 0304-3894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125541>.

YAN, K XU, H. & YOU, L. Yan. (2015). Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene. *Construction and Building Materials*, 83, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.092>.

ZHAO, Z.; LIU, W.; JIANG, Y.; WAN, Y.; DU, R.; LI, H. (2022), Solidification of Heavy Metals in Lead Smelting Slag and Development of Cementitious Materials. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 359, 132134, ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132134>.



MODIFICAÇÃO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS DRENANTES NA INDÚSTRIA DA PAVIMENTAÇÃO: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

João Paulo Marçal de Souza¹; Jessica Duarte Ribeiro Vieira¹; Fabiana Araujo Maia¹; Mayara Silva Siqueira¹; Hannah Dora de Garcia e Lacerda¹; Diego de Paiva Bezerra¹ & Luísa Eduarda Lucena de Medeiros¹

RESUMO

Com o aumento do crescimento urbano nas últimas décadas, a expansão das áreas impermeáveis tornou-se uma consequência evidente. Nessa perspectiva, estudos recentes na área da pavimentação focaram em dispositivos para promover infiltração e retardar o escoamento superficial, como o pavimento de concreto asfáltico poroso, que facilita a drenagem sob o pavimento. Tendo em vista a importância das estratégias tecnológicas para a indústria da pavimentação, este estudo teve como objetivo a análise bibliométrica das publicações sobre novos materiais na pavimentação asfáltica drenante utilizando a base de dados *Scopus*. As análises bibliométricas aplicaram-se para conhecer a evolução e produção científica, além das tendências e domínios de conhecimento. Para a pesquisa dos documentos foram utilizados os termos em inglês “*modified asphalt*” and “*modified asphalt concrete*” or CPA or “*cement replacement*” or *recycle* or *sustainab* or “*open graded asphalt*” e considerados os artigos do período de 2000 a 2024. Os resultados revelaram o aumento das publicações com o passar dos anos, enfocando áreas específicas, materiais e países mais ativos. Houve um crescimento constante nas publicações ao longo do tempo, com destaque para a China como líder em pesquisas. Os estudos destacaram os testes de desempenho e a busca por alternativas sustentáveis, como borracha de pneus e fibras de vidro, substituindo materiais convencionais no concreto asfáltico permeável.

PALAVRAS-CHAVE: Mapeamento científico; Pavimento flexível poroso; Materiais inovadores; Inovação tecnológica.

ABSTRACT

With the increase in urban growth in recent decades, the expansion of impermeable areas has become an obvious consequence. In this perspective, recent studies in the area of paving have focused on devices to promote infiltration and slow down surface runoff, such as porous asphalt concrete sidewalk, which facilitates drainage under the sidewalk. In view of the importance of technological strategies for the paving industry, this study aimed to carry out a bibliometric analysis of publications on new materials in drainage asphalt paving using the *Scopus* database. Bibliometric analysis was used to understand the evolution and scientific production, as well as trends and areas of knowledge. To search for documents, the terms “*modified asphalt*” and “*modified asphalt concrete*” or CPA or “*cement replacement*” or *recycle* or *sustainab* or “*open graded asphalt*” were used and articles from the period 2000 to 2024 were considered. The results showed an increase in publications over the years, focusing on specific areas, materials and the most active countries. There has been a steady growth in publications over time, with China standing out as the leader in research. The studies highlighted performance tests and the search for sustainable alternatives, such as tire rubber and glass fibers, replacing conventional materials in permeable asphalt concrete.

KEY WORDS: Scientific mapping; Porous flexible flooring; Innovative materials; Technological innovation.

¹ Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) – *campus* Patos, e-mails: joao.marcal@academico.ifpb.edu.br; jessica.duarte@academico.ifpb.edu.br; fabiana.araujo@academico.ifpb.edu.br; mayara.siqueira@academico.ifpb.edu.br; hannah.lacerda@ifpb.edu.br; diego.paiva@ifpb.edu.br; luisa.medeiros@ifpb.edu.br.



João Paulo Marçal de Souza,
Jessica Duarte Ribeiro Vieira, Fabiana Araujo Maia,
Mayara Silva Siqueira, Hannah Dora de Garcia e Lacerda,
Diego de Paiva Bezerra & Luísa Eduarda Lucena de Medeiros

INTRODUÇÃO

Por vários anos foi consenso que apenas revestimentos em misturas asfálticas com baixo volume de vazios, considerados impermeáveis, apresentavam desempenho adequado em campo. Entretanto, devido às mudanças climáticas, ocasionadas pelo processo de urbanização desenfreada, diversos problemas surgiram com as novas formas de contemplar o uso do solo, como enchentes, degradação das águas pluviais e até inundações (BALBO, 2007).

Nessa perspectiva, tornou-se cada vez mais evidente a necessidade da adoção de medidas com ênfase no manejo sustentável da água, o que levou ao surgimento do conceito de sistemas de controle não convencionais. Dessa forma, estratégias de gestão da água vêm sendo aplicadas em nível mundial para minimizar e solucionar os efeitos da urbanização no ciclo hidrológico. Como exemplo, a utilização de reservatórios de retenção ou detenção, com o objetivo de atenuar esse problema. No entanto, essa alternativa demanda o uso de terrenos de grandes dimensões, muitas vezes indisponíveis, e com custos elevados (ROCHA *et al.*, 2022).

Uma outra estratégia é a utilização dos pavimentos asfálticos permeáveis como ferramentas compensatórias para desvio do escoamento superficial gerado pelos picos de chuva. Nesse sentido, os pavimentos permeáveis, ao contrário dos convencionais, são capazes de captar água pela superfície do revestimento, a qual atravessa as camadas inferiores e pode ser armazenada ou infiltrada no solo para alimentação dos sistemas de águas subterrâneas. Ademais, estes pavimentos permitem a captação de águas pluviais para aproveitamento. Dessa maneira, o uso de pavimentos permeáveis pode contribuir para a melhoria do sistema de drenagem urbana, uma vez que promove o aumento de áreas permeáveis e conseqüente redução do impacto das chuvas (SCHNEIDER, 2019).

Nesse contexto, as misturas asfálticas porosas são camadas de revestimento colocadas acima de estruturas regulares de pavimentos com o objetivo de melhorar as condições de segurança do tráfego – aumento da aderência pneu-pavimento e a drenagem da água superficial - durante eventos de chuva e reduzir o ruído ao rolamento. Dessa forma, a implementação de concretos asfálticos drenantes não apenas melhoram a segurança e o conforto dos motoristas em condições de chuva, mas previne danos causados pelo acúmulo de água. Além disso, a redução do ruído ao rolamento promove um ambiente mais silencioso e agradável, beneficiando tanto os motoristas quanto as comunidades adjacentes às rodovias (QUEIROZ; MELO, 2015).

No Brasil, este tipo de mistura é conhecido como Camada Porosa de Atrito (CPA), a qual pode chegar a possuir um volume de vazios de até 25% (BALBO, 2007). Entretanto, uma das principais desvantagens das misturas porosas é sua baixa durabilidade e curta vida de serviço, o que implica na necessidade de frequentes ações de manutenção e reabilitação. De acordo com Queiroz e Melo (2015), a perda de agregados na superfície da camada é o principal fator que afeta a durabilidade destas misturas. Essa degradação pode ser agravada pela presença de umidade e/ou condições intensas de inverno, além de afetar a qualidade da passagem dos veículos e acelerar o aparecimento e a evolução de outros defeitos (QUEIROZ; MELO, 2015).

Diante desse cenário, outra possibilidade é a utilização de pavimentos asfálticos permeáveis com a incorporação de resíduos industriais, visando potencializar suas propriedades, conforme discutido por Balbo (2007). A estratégia visa promover um material que, tradicionalmente, é o responsável pela geração de grandes quantidades de escoamento superficial, em um meio para reduzir esse volume, promovendo um descarte ambientalmente correto e a melhoria das propriedades mecânicas e funcionais de revestimentos asfálticos drenantes.

Nessa perspectiva, este estudo teve como objetivo realizar uma revisão bibliométrica da pesquisa



DOI: 10.29327/1430212.49-60

MODIFICAÇÃO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS DRENANTES NA INDÚSTRIA DA PAVIMENTAÇÃO:
UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

global sobre a modificação de pavimentos asfálticos drenantes para aplicação na indústria da pavimentação asfáltica. A busca realizou-se na base bibliográfica *Scopus*, para o período de vinte anos. Os documentos encontrados foram exportados para o *Microsoft Excel* e posteriormente para o *VOSviewer* onde analisaram-se os seguintes temas: publicações e tendências de crescimento, autores e sua cooperação, análises por países e por área de conhecimento. Por fim, constatou-se a relevância do tema, quantidade de publicações realizadas e áreas primordiais para a ascensão da engenharia de pavimentos drenantes.

METODOLOGIA

Para alcance do objetivo do estudo, o programa metodológico foi dividido em três etapas distintas de acordo com a natureza e o volume das atividades planejadas. O fluxograma abaixo (Figura 1) exemplifica a sequência metodológica de execução desta investigação.

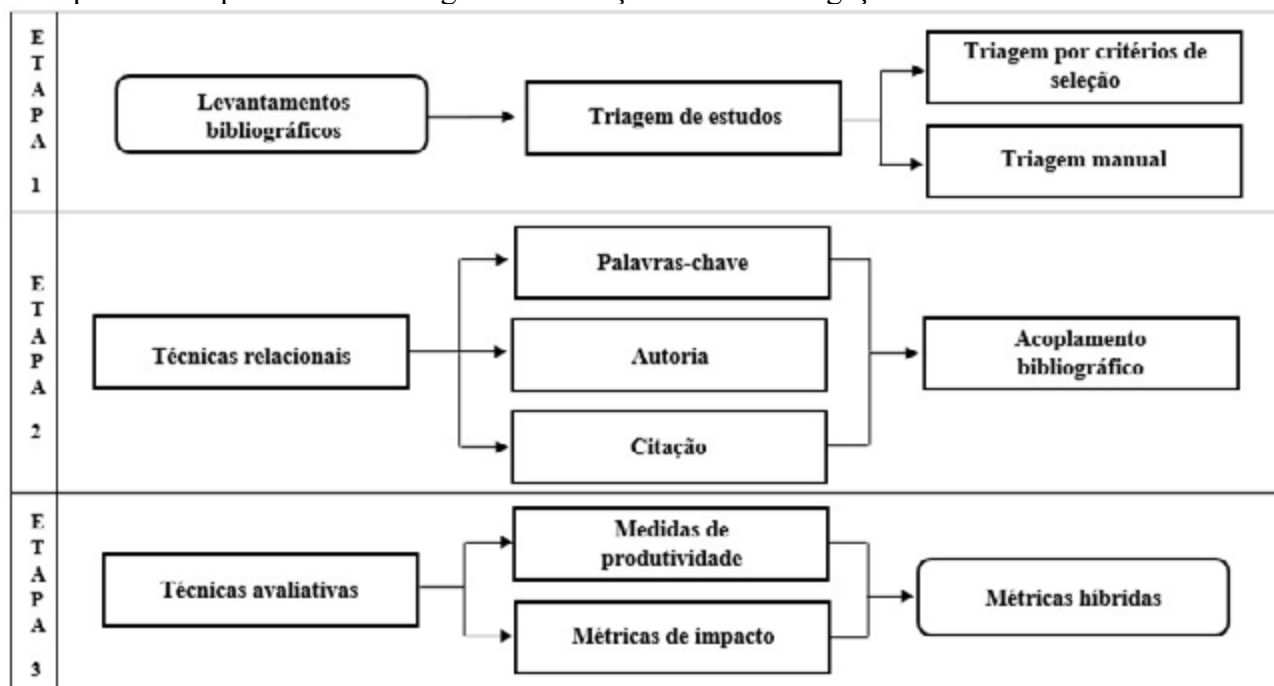


Figura 1. Programa metodológico do estudo (AUTORES, 2024).

Os itens abaixo apresentam a descrição das etapas de levantamentos bibliográficos e de aplicação das técnicas relacionais e avaliativas executadas no estudo.

Levantamentos bibliográficos

A primeira etapa compreendeu a pesquisa bibliográfica e revisão da literatura. Esta etapa abrangeu a consulta bibliográfica na base de dados *Scopus*. O período temporal do estudo foi dos últimos vinte e quatro anos (2000-2024). A consulta avançada na base de dados da *Scopus* compreendeu um levantamento por palavras-chave, descritores e auxílio dos operadores booleanos *and* e *or*. As palavras-chave utilizadas para busca dos artigos foram: “*modified asphalt*” and “*modified asphalt concrete*” or CPA or “*cement replacement*” or *recycle* or *sustainab* or “*open graded asphalt*”. Com o levantamento sem filtragem de dados, foram obtidos 479 documentos. Com a aplicação dos filtros para aprimoramento da amostra levantada de estudos, como detalhamento de artigos em inglês e artigos no tipo de documento, a busca resultou em 272 documentos.



João Paulo Marçal de Souza,
 Jessica Duarte Ribeiro Vieira, Fabiana Araujo Maia,
 Mayara Silva Siqueira, Hannah Dora de Garcia e Lacerda,
 Diego de Paiva Bezerra & Luísa Eduarda Lucena de Medeiros

Técnicas relacionais

A bibliometria faz uso de uma série de indicadores que mapeiam e possibilitam a expressão quantitativa das características bibliográficas dos documentos analisados, bem como das relações entre tais características (QUEVEDO-SILVA *et al.*, 2016). Nessa perspectiva, os dados encontrados na base de dados da Scopus foram agrupados em uma lista na própria base de dados. A apuração desses dados foi executada através do *Microsoft Excel* e no software *VOSviewer*. Para análise relacional, foram examinados, por meio do *VOSviewer*, a produtividade por co-citação, co-autoria e co-palavras dos estudos levantados.

Técnicas avaliativas

As técnicas avaliativas compreenderam as medidas de produtividade por número de artigos por ano acadêmico e por autor; às medidas de impacto por total de citações, número de citações e citações por autor; e as medidas híbridas que eram o conjunto das medidas avaliativas, ou seja, visando o impacto da colaboração de autores (QUEVEDO-SILVA *et al.*, 2016).

Através da técnica de mapeamento, foi possível calcular e posicionar cada tema em um mapa bidimensional que espelha a semelhança e conexão entre os artigos. Nessa representação visual, o tamanho de cada agrupamento reflete a quantidade de publicações associadas; os grupos maiores englobam um maior número de artigos, enquanto as distâncias entre os aglomerados indicam, em termos aproximados, a relação com base em citações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Identificaram-se 272 publicações relacionadas com inovação de materiais para a pavimentação asfáltica drenante, dos quais 192 eram artigos provenientes de pesquisas originais como apresentado na Tabela 1. Em eventos acadêmicos como congressos, seminários, foram identificados 70. Artigos com acesso antecipado foram 6, ou seja, artigos finais em texto completo, revisados por pares e editados, disponibilizados e publicados on-line antes de serem atribuídos a um volume e edição da revista. E, por fim, foram levantados 4 artigos de revisões da literatura.

Tabela 1. Tipos de documentos e suas publicações (AUTORES, 2024).

Tipos de documentos	Publicações
Artigos originais	192
Artigos de conferências	70
Acesso antecipado	6
Artigos de revisão	4

O número de publicações é importante porque indica as tendências relacionadas com o tema de pesquisa. Assim, sobre materiais inovadores na pavimentação asfáltica drenante as publicações começaram a ser influentes em 2004. Nesse ano só tinha sete publicações, até 2010 as publicações eram limitadas a aproximadamente quarenta publicações. A década de 2010 foi a mais influente, com uma quantidade de trabalhos publicizados de aproximadamente 140 estudos. Cabe destacar que o ano de 2023 foi o ano que obteve o maior índice de estudos publicados com uma quantidade de 35 estudos, sendo esta uma quantidade que levou aproximadamente 10 anos (2000-2010) para ser publicado esse quantitativo de artigos.

O número de publicações por ano na Figura 3, mostra a importância que a pesquisa sobre os materiais inovadores na pavimentação asfáltica drenante teve depois de 2010. É imperativo ressaltar



DOI: [10.29327/1430212.49-60](https://doi.org/10.29327/1430212.49-60)

MODIFICAÇÃO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS DRENANTES NA INDÚSTRIA DA PAVIMENTAÇÃO:
UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

que o ano de 2024 obteve uma queda, haja vista que só foram incluídos os estudos publicados até a primeira semana de janeiro de 2024.

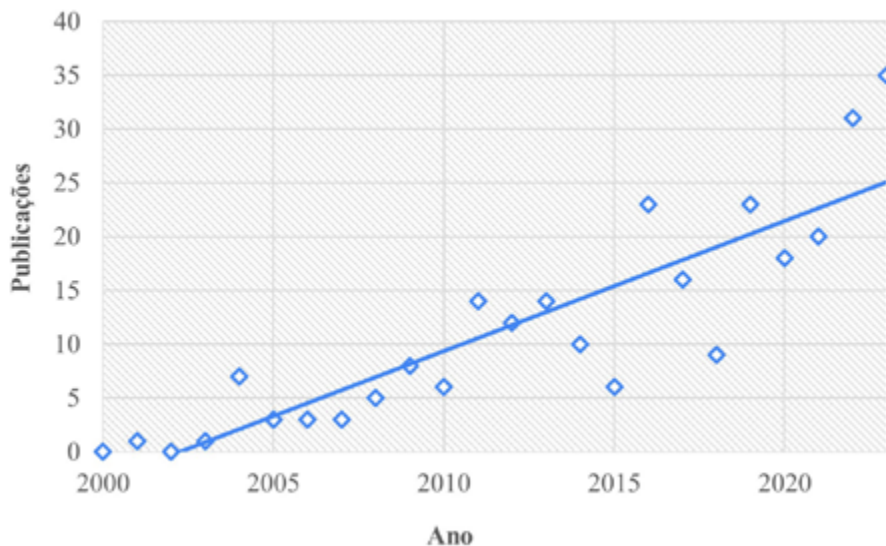


Figura 3. Número de publicações nos últimos 24 anos (2000-2024) (AUTORES, 2024).

Nos anos de 2016-2017 alcançou-se um patamar de aproximadamente 40 estudos, nos anos de 2018-2019 diminuiu para aproximadamente 30 e em 2020 foram registradas 18, indicando uma queda. Uma interpretação desse fenômeno é apresentada a partir da perspectiva da bibliometria, que aponta para a presença de uma tendência nas publicações. As diretrizes bibliométricas carecem da precisão característica das ciências exatas; são representações variáveis ou diferentes manifestações de um mesmo fenômeno, considerando diversos pontos de vista (PORTER; WOOK, 2021).

Rede de trabalhos: a cooperação entre autores

A cooperação científica remonta a um processo praticamente espontâneo, que se manifesta na troca de conhecimentos, informações, experiências e pessoal. A estrutura do mundo atual tem levado a considerar predominantemente formas de cooperação unidirecional entre países desenvolvidos e em desenvolvimento (ROLIM; MOURA, 2018).

As 272 publicações levantadas foram escritas por um total de 756 autores, a Figura 4 apresenta os dez autores mais produtivos no tema de materiais inovadores. A classificação baseia-se na quantidade de publicações de cada autor e sua influência de citações em produtividade, Wu S. é o mais importante com dezesseis publicações, seguido por Li Y. com onze publicações. Após, destacam-se Zhang Y., Li H., Wang Y. e Han J., ambos com sete publicações; seguido por Habbouch J. e Li Q. com seis publicações destaques. Depois vem Al-Abdul Wahhab H. I. e Yang, J. os quais possuem cinco publicações.



João Paulo Marçal de Souza,
 Jessica Duarte Ribeiro Vieira, Fabiana Araujo Maia,
 Mayara Silva Siqueira, Hannah Dora de Garcia e Lacerda,
 Diego de Paiva Bezerra & Luísa Eduarda Lucena de Medeiros

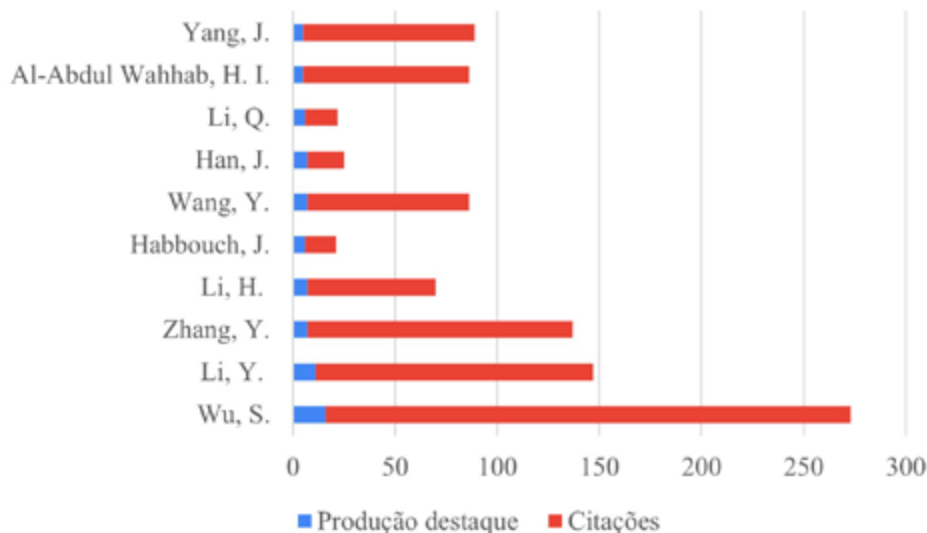


Figura 4. Número de publicações por autor (AUTORES, 2024).

Para tanto fica evidente que, embora o número de publicações tenha crescido ao longo do tempo, ainda é baixo e com apenas a produtividade de citações acentuada.

A rede de colaboração de autores mostra-se na Figura 5, onde utilizaram-se 1.502 documentos, o tipo de análises para esta figura foi co-autoria na qual a unidade de análises são os autores, utilizou o método de contar completo o qual tinha um número máximo de autor por documento de 25 e mínimo de 1, em total foram selecionados 756 autores, o tamanho dos círculos representa a quantidade de publicações que tem cada autor, quanto maior o círculo maior sua importância.

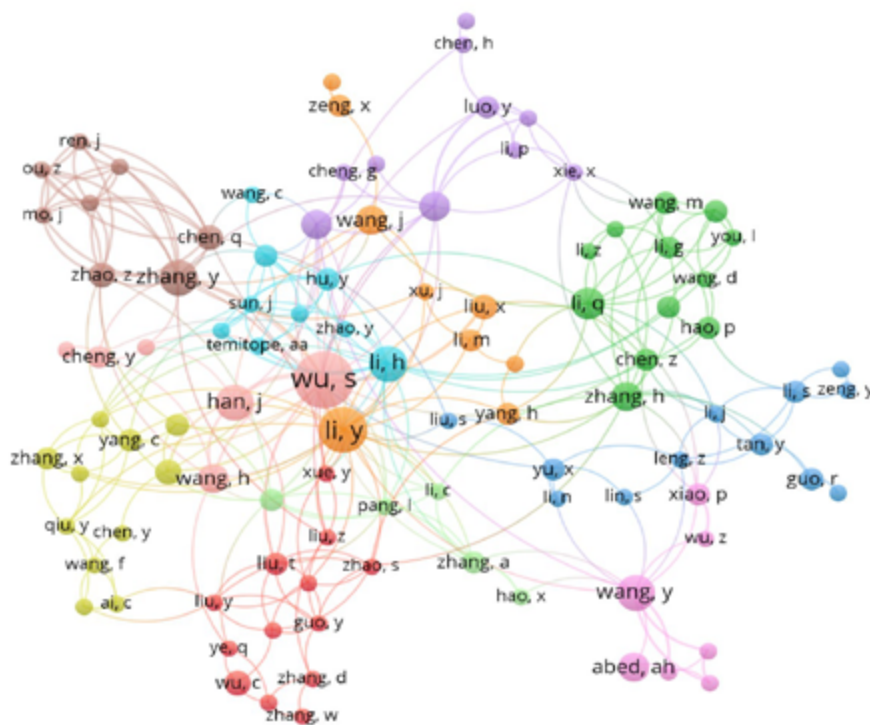


Figura 5. Rede colaborativa de autores (AUTORES, 2024).



DOI: 10.29327/1430212.49-60

MODIFICAÇÃO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS DRENANTES NA INDÚSTRIA DA PAVIMENTAÇÃO: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

As linhas que unem cada círculo representam a cooperação entre eles e as cores dos grupos. Distinguem-se dois grupos principais de autores, sendo Wu S. e Li Y, os quais estão contribuindo amplamente com todos os outros grupos secundários de autores. Dos 756 autores, 52 deles têm realizado trabalhos em co-autorias, os quais são representados pelos grupos de Zhang Y (roxo escuro), Li H (azul claro), Wang J. (roxo claro), Zhang H. (verde escuro), Tan Y. (azul escuro), Wang Y. (fúcsia) e Wang H. (verde claro).

Também é possível ver na figura a rede existente entre agrupamentos, é o caso de Wang Y que trabalha em conjunto com o agrupamento fúcsia, azul, verde e uma parte do laranja. O pesquisador Wang H, que trabalha com o agrupamento vermelho, rosa e verde claro e verde escuro. O pesquisador Wang J que trabalha com os agrupamentos laranja, roxo e azul, e o pesquisador Yang H que trabalha em conjunto com o agrupamento laranja, azul claro, azul escuro e verde escuro. Todas essas redes indicam trabalho multidisciplinar, pesquisas conjuntas entre diversas instituições e países.

Cooperação geográfica e institucional

Sobre esse tópico foi possível identificar que o meio com maior número de publicações foi o *Virginia Transportation Research Council* que visa a pesquisa e inovação de materiais para a área de transportes do estado da Virgínia (Estados Unidos da América). Entretanto, o país com maior destaque de publicações é a China por órgão destaque em cooperação institucional (Tabela 2).

Tabela 2. Universidades, institutos e órgãos mais representativos (AUTORES, 2024).

Universidades mais representativas		
Universidades	Países	Publicações
<i>University of malaya</i>	Malásia	3
<i>Al-nahrain university</i>	Iraque	3
<i>Hunan university</i>	China	3
<i>Jilin university</i>		3
<i>King fahd university of petroleum and minerals</i>	Arábia Saudita	3
<i>King fahd university of petroleum and minerals</i>		3
<i>Nguyen tat thanh university</i>	Vietnã	3
<i>Iran university of science and technology</i>	Irã	4
<i>Harbin institute of technology</i>	China	3
<i>Wuhan university of technology</i>		3
<i>Virginia transportation research council</i>	Estados Unidos da América (EUA)	5

As publicações de materiais inovadores provêm de 39 países ou territórios, dos quais 18 encontram-se na Ásia, 12 na Europa, 5 na América, 3 na África e 1 na Oceania, conforme apresentado na Figura 6. Cabe destacar que os dez países que mais se destacaram foram: i) China (123 publicações); ii) EUA (37 publicações); iii) Irã (17 publicações); iv) Iraque (14 publicações); v)



João Paulo Marçal de Souza,
 Jessica Duarte Ribeiro Vieira, Fabiana Araujo Maia,
 Mayara Silva Siqueira, Hannah Dora de Garcia e Lacerda,
 Diego de Paiva Bezerra & Luísa Eduarda Lucena de Medeiros

Itália e Índia (11 publicações ambos); vi) Arábia Saudita e Malásia (9 publicações ambos); vii) Coreia do Sul (8 publicações); e viii) Austrália (6 publicações).

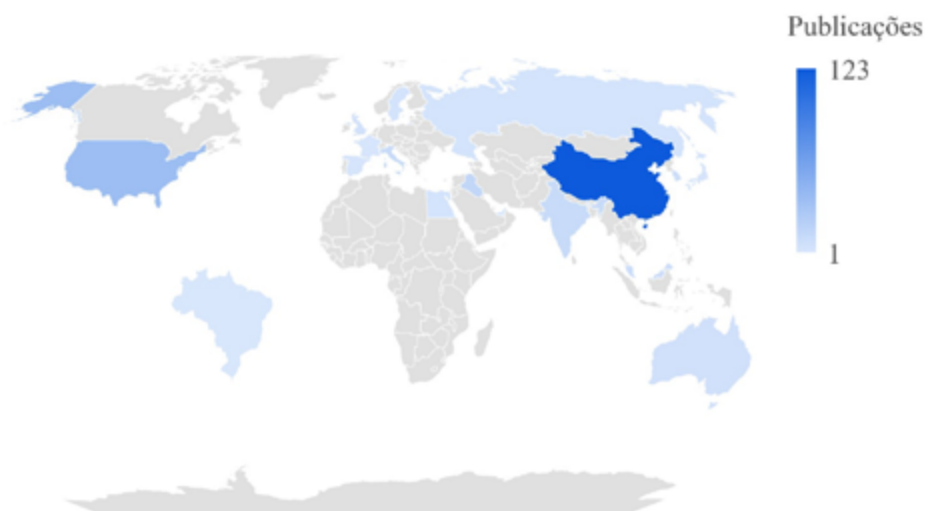


Figura 6. Destaque de publicações por países (AUTORES, 2024).

A rede de cooperação entre países apresenta-se na Figura 7, para processamento de dados utilizou-se a análise por co-autoria. A co-autoria foi a unidade de análises nos países, utilizou-se o método de contar completo o qual teve o número máximo de países por documento de 25. Selecionaram-se limites de documentos de um país utilizando 1 e de citações de um país utilizando 0, em total selecionaram-se 39 países. Entretanto, os países destaque na cooperação à nível mundial foram um total de 23 países conforme apresentado na figura 7.



Figura 7. Colaboração entre países (AUTORES, 2024).

As linhas que unem cada círculo representam a cooperação entre eles, as cores representam os grupos. Na rede podem distinguir-se sete grupos principais, sendo China, Estados Unidos, Itália, Coreia do Sul, Índia, Iraque e Malásia. Os 23 países uniram-se entre continentes no período de 2010 a 2020 e realizaram trabalhos em co-autorias, os quais podem ser visualizados na cor roxa, azul claro, verde e amarelo.

DOI: [10.29327/1430212.49-60](https://doi.org/10.29327/1430212.49-60)

MODIFICAÇÃO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS DRENANTES NA INDÚSTRIA DA PAVIMENTAÇÃO: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

Análise por palavras-chave

Analisaram-se os termos utilizados nos títulos e resumos das publicações para conhecer tendências e maiores informações sobre o tema de materiais inovadores na indústria da pavimentação drenante. Os resultados são apresentados na Figura 8, observam-se dois grandes agrupamentos: vermelho e verde. As palavras-chave do agrupamento vermelho foram concreto asfáltico, geossintéticos, performance laboratorial, características reológicas, asfalto modificado. O agrupamento verde está composto por asfalto, asfalto modificado por polímero, durabilidade, cimento, resistência, propriedades mecânicas, resíduos, geopolímeros.

Os temas tratados por agrupamento são característicos. O agrupamento verde é responsável por estudos com enfoque no processo de práticas de modificação, uso eficiente de recursos e desenvolvimento sustentável. Enquanto o agrupamento vermelho é responsável pelas características e análises laboratoriais, ou seja, são análises normativas para justificativa do uso de diversos materiais com influência do tempo e resultados das estruturas criadas.

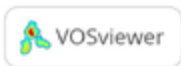
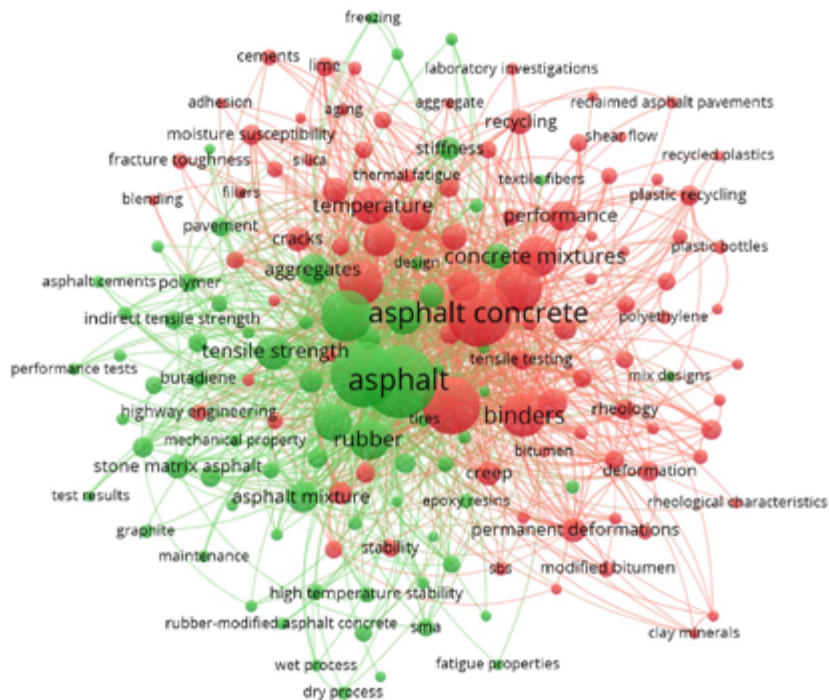


Figura 8. Rede de palavras-chave (AUTORES, 2024).

A Figura 9 mostra as palavras-chave das publicações com informação de tempo, as palavras utilizadas antes de 2016 mostram a cor verde escuro e azul e incluem asfalto, análise térmica, agregados, misturas asfálticas, susceptibilidade de misturas. Enquanto as palavras mais recentes aparecem nas cores verde e amarelo e são desempenho, reciclagem de polímeros, pavimentos, energia, condutividade térmica, energia de desempenho, alta performance, características reológicas.



João Paulo Marçal de Souza,
 Jessica Duarte Ribeiro Vieira, Fabiana Araujo Maia,
 Mayara Silva Siqueira, Hannah Dora de Garcia e Lacerda,
 Diego de Paiva Bezerra & Luísa Eduarda Lucena de Medeiros

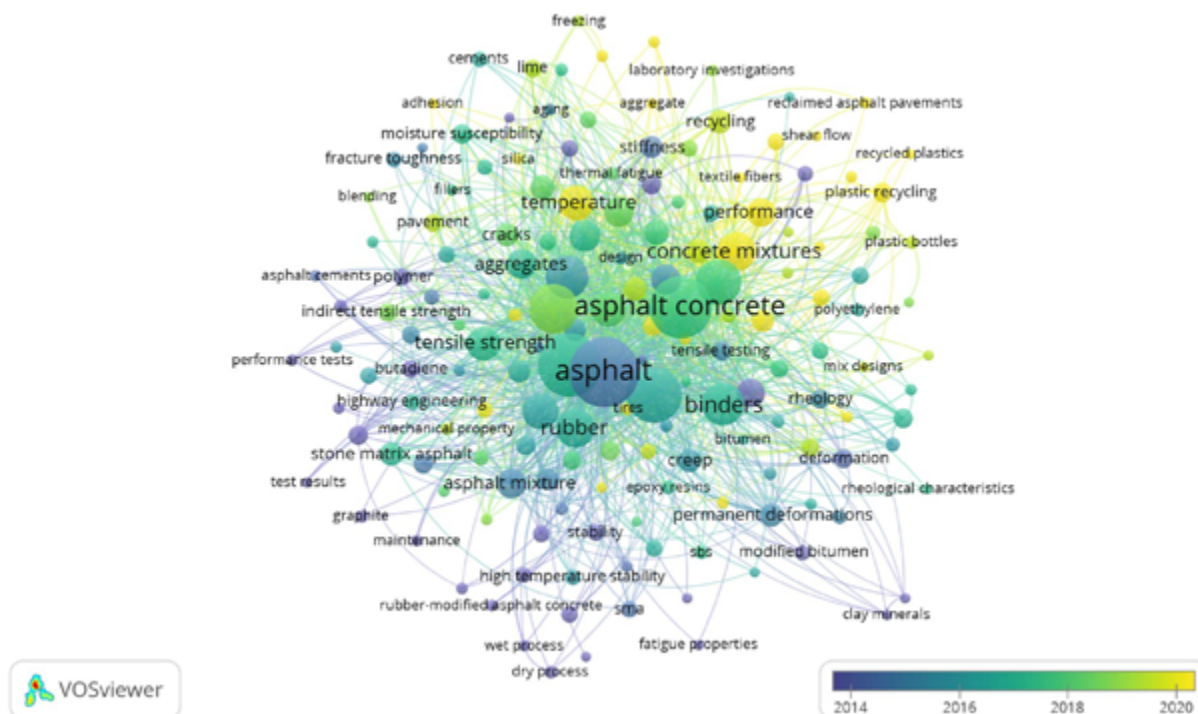


Figura 9. Rede de palavras-chave por ano (AUTORES, 2024).

A situação atual da construção, na que muitas vezes é um problema, a obtenção de materiais adequados faz com que se faça uso de materiais de alta tecnologia com propriedades avançadas como os compósitos que produzem uma desmaterialização física das obras e por outro lado o reciclado de produtos obtidos na própria obra mediante demolições e reaproveitamento de materiais os quais são despejados ambientalmente incorretamente com os novos produtos e novas propostas para construir pavimentos sustentáveis. Isto leva a modificar o que por muitos anos tem sido feito, onde deve ser consideradas maiores exigências de qualidade, por outro lado o uso de materiais inovadores pode gerar mais custos devido a pesquisa que precisa ser feita do material (GUO *et al.*, 2020).

Uma das vantagens do concreto asfáltico drenante e sustentável é a redução de custos, uma pesquisa foi conduzida, considerando a produção em larga escala de agregados reciclados por uma usina de reciclagem situada em Medellín. Foi estipulado um pagamento por metro cúbico (m^3), variando de acordo com a percentagem de substituição de agregados, sendo importante destacar que o custo do agregado reciclado corresponde a 65% do valor do agregado convencional (BEDOYA; DZUL, 2015).

Quanto à modificação parcial e total de resíduos em misturas asfálticas, o cimento desempenha um papel crucial na formulação de misturas asfálticas porosas. De acordo com Di Mundo *et al.* (2019), a incorporação de compostos cimentícios contendo borracha reciclada não apenas proporciona os benefícios típicos de um agregado leve, mas também confere a vantagem da hidrofobicidade, contribuindo assim para valorizar uma matéria-prima secundária relevante em escala global. Os resultados da pesquisa indicam que os compósitos de borracha e cimento exibem maior porosidade em toda a faixa investigada, sendo mais sensíveis na faixa detectável mais baixa (DI MUNDO *et al.*, 2019).



DOI: [10.29327/1430212.49-60](https://doi.org/10.29327/1430212.49-60)

MODIFICAÇÃO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS DRENANTES NA INDÚSTRIA DA PAVIMENTAÇÃO: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo bibliométrico realizado proporcionou uma compreensão abrangente dos artigos atuais na literatura científica referentes a modificação e reciclagem de pavimentos de concreto asfáltico permeável, com o objetivo de avaliar o progresso nessa área e oferecer uma visão atualizada do estado da arte sobre o tema. As dificuldades apresentadas durante esse processo estão voltadas, principalmente, à área de filtragem, pois após a investigação na base de dados da *Scopus* os documentos encontrados carecem ser traduzidos, lidos e classificados. Todo o processo assegura que a filtragem seja confiável e precisa fornecer dados que retratam a realidade.

Foi evidenciado que o assunto é relativamente recente, demonstrando um aumento significativo no número de publicações e citações nos últimos cinco anos. Dentre essas pesquisas, destacam-se áreas como Engenharia Civil e Ciência dos Materiais como os principais setores envolvidos nos estudos.

As análises de desempenho estavam concentradas na avaliação da resistência mecânica do concreto asfáltico modificado em diversas condições, examinando suas reações a agentes químicos e investigando as melhores dosagens e técnicas de produção. Nessa perspectiva, a busca por materiais sustentáveis para substituir o agregado reflete uma tendência global visando mitigar os impactos negativos da construção civil. O foco principal das pesquisas analisadas era verificar como a introdução desses materiais reciclados afeta as propriedades de resistência, trabalhabilidade e custo do pavimento. Dentre os materiais estudados, destacam-se os materiais poliméricos, as fibras e os materiais reciclados provenientes de resíduos sólidos da construção civil.

Com os resultados obtidos é possível confirmar que países como China e Estados Unidos da América destacam-se na pesquisa e publicações científicas na área de estudo deste trabalho. Ambos os países são referência tanto em qualidade de publicações como em quantidade de artigos. No Brasil a pesquisa desenvolvida na área de pavimento asfáltico drenante é muito pequena, sendo que apenas um artigo publicado no período entre 2000 e 2024 na base de dados *Scopus*.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro do Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para realização da pesquisa e pagamento das bolsas, através do edital nº 28/2023 (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – PIBITI/CNPq). À Diretoria de Pesquisa – PRPIPG e à Coordenação de Pesquisa do *campus* Patos pelo suporte.

REFERÊNCIAS

- BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BARROS, K. S. Estudo de Cinzas Volantes de uma Termelétrica da RMF para Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/25073>. Acesso em: 05 mar. 2024.
- BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G. et al. *Evaluación de una mezcla de concreto asfáltico con incorporación de agregados reciclados de concreto*. *Revista UIS Ingenierías*, [S.l.], v. 20, n. 2, p. 75-84, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021007>.
- BEDOYA, C.; DZUL, L. *Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project*. *Revista Ingenieria de Construccion*, [S.l.], v. 30, n. 2, p. 99-108, 2015.
- BRILHANTE, A. K. V. C. Transição para Cidade-Esponja: Desafios e Oportunidades para a Cidade de João Pessoa-PB. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, UFPB, João Pessoa, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/25096>. Acesso em: 22 dez. 2023.



João Paulo Marçal de Souza,
 Jessica Duarte Ribeiro Vieira, Fabiana Araujo Maia,
 Mayara Silva Siqueira, Hannah Dora de Garcia e Lacerda,
 Diego de Paiva Bezerra & Luísa Eduarda Lucena de Medeiros

CARMO, J. B. do; SOARES, L. C.; ZANETTE, F. C. Análise comparativa de desempenho do pavimento permeável e asfáltico quando aplicado em um estacionamento residencial de Belo Horizonte. *Paramétrica*, [S.l.], v. 13, n. 14, p. 2–15, 2021. Disponível em: <https://www.periodicos.famig.edu.br/index.php/parametrica/article/view/262>. Acesso em: 17 mar. 2024.

CUNHA, C. B. da. *et al.* Avaliação de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado. *Revista Matéria*, [S.l.], v. 23, n. 3, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/Zw9WDCGwwJqh5yQZvD5JV3r/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 25 abr. 2024.

DI MUNDO, R. *et al.* *Water absorption in rubber-cement composites: 3D structure investigation by X-ray computed-tomography*. *Construction and Building Materials*, v. 228, 2019.

GUO, M. *et al.* *Characterization of the mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sea sand and seawater based on statistical analysis*. *Construction and Building Materials*, v. 234, 2020.

KLAMT, R. A. *et al.* Estudo da Utilização da Reciclagem de Concreto Asfáltico como Camada de Pavimento. *Revista de Gestão Ambiental & Sustentabilidade*, [S.l.], v. 7, n. 3, p. 539–553, 2018. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/11517>. Acesso em: 5 jan. 2024.

MARTÍNEZ-MOLINA, W. *et al.* Concreto reciclado: uma revisão. *Revista ALCONPAT*, v. 5 n. 3 set./dez. 2015. Disponível em: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000300235&lng=es&nrm=iso&tlng=es&ORIGINALLANG=es. Acesso em: 23 dez. 2023.

PORTER, S. J.; WOOK, D. W. *Connecting Scientometrics: Dimensions as a route to broadening context for analyses*. *Computer Science*, v. 20, n. 1, p. 87–108, 2021.

QUEIROZ, B. O. de; MELO, R. A. de. Propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas asfálticas porosas com adição de politereftalato de etileno (PET). In: Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte, 29., 2015. Anais [...]. Ouro Preto: ANPET, 2015. Disponível em: http://146.164.5.73:20080/ssat/interface/content/anais_2015/TrabalhosFormatados/RT784.pdf. Acesso em: 05 abr. 2024.

QUEVEDO-SILVA, F. *et al.* Estudo bibliométrico: orientações sobre sua aplicação. *Revista Brasileira de Marketing*, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 246-262, abr./jun. 2016. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=471755312008>. Acesso em: 20 abr. 2024.

RIOS, F. R. de A.; BARBOSA SOBRINHO, A. A.; MORAIS, C. S. R. Análise térmica de asfalto do petróleo, modificado com resíduos polimérico. *RunPetro*, [S.l.], v. 2, n. 2, abr./set. 2014. Disponível em: <https://repositorio.unp.br/index.php/runpetro/article/view/673>. Acesso em: 15 abr. 2024.

ROCHA, L. A. *et al.* Influência da estimativa do tempo de concentração no dimensionamento de um reservatório de detenção. *Revista Valore, Volta Redonda*, v. 7, n. 1, p. 1-16, jan./dez. 2022. Disponível em: <https://revistavalore.emnuvens.com.br/valore/article/view/614>. Acesso em: 05 fev. 2024.

ROLIM, L. J.; MOURA, V. B. Análise cienciométrica sobre pavimentos de concreto. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - UniEvangélica, Anápolis, Goiás, 2018.

SAOULA, S. *et al.* *Improvement of the performances of modified bituminous concrete with EVA and EVA-waste*. *Physics Procedia*, v. 2, n. 3, nov. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2009.11.098>.

SCHNEIDER, D. *et al.* Comportamento hidráulico e mecânico de uma mistura asfáltica aberta enquadrada como camada porosa de atrito. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Anais [...]. Balneário Camboriú: ANPET, p. 1624-1635, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267787891_COMPORTEAMENTO_MECANICO_DE_MISTURAS_ASFALTICAS_DO_TIPO_SMA_CONCRETO_ASFALTICO_E_AREIA-ASFALTO. Acesso em: 03 mar. 2024.

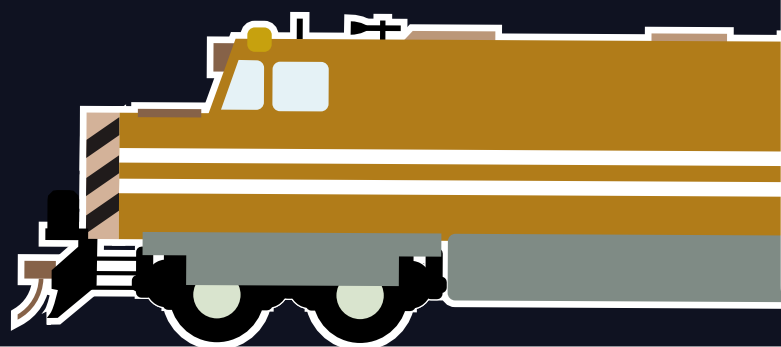


26° Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br



ABDER



**TECNOLOGIAS E METODOLOGIAS
PARA AVALIAÇÃO E GESTÃO DA
INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA**

PROGRAMAÇÃO
TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS E ESTUDOS DE CASOS DE OBRAS
Terça-feira, 20 de agosto

SALA TERRA CAÍDA		
TECNOLOGIAS E METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO E GESTÃO DA INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA (ST02)		
⌚ 09:00	EC536	AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DISTINTOS PELO MÉTODO DA MANCHA DE AREIA
⌚ 09:20	EC101	APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINA PARA A DETERMINAÇÃO DA MACROTEXTURA EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM
⌚ 10:20	EC403	GESTÃO DE PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS: UMA ABORDAGEM COM TECNOLOGIA DE MONITORAMENTO
⌚ 10:40	EC635	ESTUDO DE CASO: UTILIZAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS PARA CATALOGAÇÃO E MONITORAMENTO DA MALHA RODOVIÁRIA DA 26ª UNIDADE REGIONAL DO DER/MG
⌚ 11:00	TT569	ANÁLISE DE MODELOS DE PREVISÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS A PARTIR DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO PAVIMENTO
⌚ 11:20	EC910	GESTÃO DE ATIVOS RODOVIÁRIOS ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DATA-DRIVEN E BIM
⌚ 11:40	EC644	DEFEITOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: ESTUDO DE CASO EM ESTRADA QUE INTERLIGA OS MUNICÍPIOS DE MISSAL E ITAIPULÂNDIA - PR
⌚ 12:00	TT326	CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL DE PAVIMENTO FLEXÍVEL POR MEIO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE GLOBAL: ESTUDO DE CASO DA CE-513
⌚ 12:20	TT806	VIAS PRINCIPAIS DE ACESSO À ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA EM SALVADOR: UM ESTUDO DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO VISUAL CONTÍNUO



AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DISTINTOS PELO MÉTODO DA MANCHA DE AREIA

Suzane Nogueira da Silva¹; Matheus Chagas Vital²; Carlos Bruno da Silva Fernandes³; Lucas Cavalcante de Almeida⁴; Francisco Heber Lacerda de Oliveira⁵

RESUMO

Os pavimentos rodoviários são essenciais para garantir uma trafegabilidade confortável e segura em todas as condições. A superfície do pavimento é fundamental na interação entre veículos e infraestrutura rodoviária, influenciando diretamente no conforto ao rolamento. Dentre as características superficiais, a macrotextura se destaca como um parâmetro importante no desempenho das rodovias, afetando diretamente a drenabilidade, o ruído e a resistência à derrapagem. Este estudo analisou a macrotextura, utilizando o método da mancha de areia, em três misturas asfálticas distintas aplicadas nas rodovias BR-122, CE-513 e CE-580 em Quixadá, Ceará. As vias selecionadas apresentam idades e tipos de revestimento asfáltico distintos, incluindo Concreto Asfáltico (CA), Areia Asfalto Usinada à Frio (AAUF) e Tratamento Superficial Duplo (TSD). Os resultados obtidos constataram que os segmentos estudados possuem macrotexturas muito abertas, não atendendo aos padrões recomendados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diante disso, o estudo destaca a importância da manutenção nos revestimentos existentes para assegurar que os pavimentos permaneçam dentro dos padrões normativos, visando não apenas a segurança dos usuários, mas também a durabilidade da infraestrutura rodoviária.

PALAVRAS-CHAVE: Macrotextura; Revestimento; Mancha de Areia; Segurança; Conforto.

ABSTRACT

Road pavements are essential to ensure comfortable and safe trafficability under all conditions. The pavement surface is fundamental in the interaction between vehicles and road infrastructure, directly influencing rolling comfort. Among the surface characteristics, macrotexture stands out as an important parameter in road performance, directly affecting drainage, noise, and skid resistance. This study analyzed the macrotexture using the sand patch method on three different asphalt mixes applied on highways BR-122, CE-513, and CE-580 in Quixadá, Ceará. The selected roads have different ages and types of asphalt pavement, including Asphalt Concrete (AC), Cold Machined Asphalt Sand (AAUF), and Double Surface Treatment (TSD). The results found that the studied segments have very open macrotextures, not meeting the standards recommended by the National Department of Transportation Infrastructure (DNIT). Therefore, the study highlights the importance of maintaining existing coatings to ensure that pavements remain within regulatory standards, aiming not only for the safety of users but also for the durability of road infrastructure.

KEY WORDS: Macrotexture; Coating; Sand Stain; Security; Comfort.

^{1,4,5} Universidade Federal do Ceará - UFC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes - PETRAN, Campus de Fortaleza, suzane.nogueira@det.ufc.br; lucascavalcante@det.ufc.br; heber@det.ufc.br.

^{2,3} Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Campus de Quixadá, matheuschasgavital@gmail.com; carlos.bruno08@aluno.ifce.edu.br.



INTRODUÇÃO

O modo rodoviário destaca-se como o mais utilizado no Brasil, atendendo cerca de 60% de toda carga transportada internamente no País. Para isso, o pavimento deve oferecer condições operacionais, visando proporcionar ao usuário conforto ao rolamento e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2022). De acordo com a pesquisa CNT (2023), há uma piora significativa dos índices de qualidade das rodovias brasileiras, nas quais o quesito pavimento possui 55,5% da extensão pesquisada classificada como regular, ruim ou péssima.

O pavimento é uma junção de camadas responsáveis por transmitir as solicitações do tráfego ao subleito, além de ser responsável por garantir o trânsito de forma confortável e segura em todas as épocas e em diferentes condições climáticas. A superfície do pavimento é o meio pelo qual os veículos interagem com a estrutura rodoviária, como também, é a condição superficial que se relaciona diretamente com o usuário. Dessa forma, características da camada de rolamento estão ligadas ao desempenho do pavimento, seja afetando a segurança viária, pois possui atuação direta na resistência à derrapagem, detalhe este bastante significativo para zonas de curvas e zonas de frenagem, ou seja, afetando a conforto ao rolamento, o ruído, o consumo de combustível, desgaste de pneus e até mesmo tempo de viagem (APS, 2006).

A ação do tráfego e as intempéries desgastam a camada de revestimento durante toda sua vida útil e as condições da superfície mudam com o tempo. Segundo Bernucci *et al.* (2022), para a avaliação da textura pode-se estudar a aspereza dos agregados (microtextura), como também, a rugosidade formada por um conjunto de agregados (macrotextura). A mudança de textura pode acarretar uma piora no desempenho funcional das rodovias, apresentando superfícies lisas ou rugosas. Assim, os usuários começam a lidar com fenômenos indesejáveis, como hidroplanagem, espelho d'água e *spray*, oriundos das precárias condições de drenagem, redução da resistência à derrapagem, consequências de uma textura lisa, entre outros problemas que interferem na segurança e conforto.

A análise da relação entre a macrotextura dos pavimentos flexíveis e a segurança rodoviária tem sido objeto de estudos em contextos internacionais. Na Austrália, pesquisas como as de Cairney *et al.* (2008) demonstram uma correlação exponencial entre a macrotextura e a redução nas taxas de acidentes rodoviários. Similarmente, um estudo de caso na Carolina do Norte, nos Estados Unidos, realizado por Pulugurtha *et al.* (2011), identificou que um aumento na macrotextura está associado a uma diminuição no número de acidentes. No Reino Unido, estudos conduzidos por Roe *et al.* (1991) exploraram como a insuficiência na profundidade da macrotextura pode contribuir para a ocorrência de acidentes. Estudos paralelos na Itália, realizados por Gothié *et al.* (2001), confirmam essa linha de investigação, destacando a importância da textura superficial na prevenção de acidentes.

Tendo em vista o exposto e que cerca de 90% da malha rodoviária pavimentada é de pavimento flexível, observa-se, a importância de estudos voltados para o aprofundamento a respeito da textura superficial e sua analogia com a eficiência e segurança (CNT, 2023). Nesse contexto, o presente estudo buscou investigar a condição da macrotextura asfáltica em revestimentos distintos a partir do ensaio da mancha de areia em três trechos rodoviários na cidade de Quixadá, no Ceará.



DOI: 10.29327/1430212.49-90

AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS
DISTINTOS PELO MÉTODO DA MANCHA DE AREIA

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Textura Superficial

A textura dos pavimentos pode ser analisada pelo comprimento de onda presente na superfície de rolamento, que é a distância entre dois picos ou depressões na superfície e pode ser dividida em quatro categorias: microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidade. O principal objetivo desse entendimento é estabelecer os domínios de dimensões da superfície dos pavimentos para a classificação de suas texturas (MOMM, 1998)

A microtextura e macrotextura asfáltica são parâmetros essenciais na avaliação funcional dos pavimentos rodoviários, esta distinção é fundamental para compreender o desempenho e a segurança das vias (FERREIRA, 2002). Conforme Santos (2008), é comum confundir as definições de micro e macrotextura, contudo, ele explica que no que diz respeito à microtextura, considera-se a superfície em si do agregado, analisando a quão rugosa ou polida ela é. Já no contexto da macrotextura, é estudado a altura existente entre os agregados, mede-se os espaços contidos entre os materiais do revestimento, podendo chegar a uma superfície aberta, quando contém agregados de granulação grossa, mas se a proporção de agregados finos for substancial, então ela pode ser designada como fechada. A Figura 1 destaca a diferença entre as duas texturas.



Figura 1. Representação da Microtextura e a Macrotextura (MATTOS, 2009).

De acordo com Callai (2011), o intuito de estudar a textura do pavimento é considerar sua influência na segurança e conforto viário, visando os critérios de frenagem, drenagem superficial, ruído, conforto ao dirigir, desgaste dos pneus, entre outros aspectos. A Figura 2 apresenta os principais fatores afetados pela textura, onde a macrotextura influencia em todos os parâmetros mostrados.

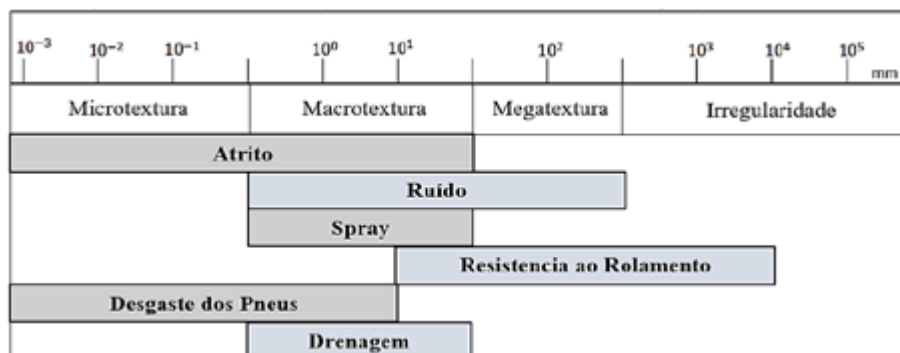


Figura 2. Influências das Texturas (CALLAI, 2011).



Sabe-se que a macrotextura asfáltica, quando fora dos parâmetros normativos, pode afetar a segurança viária e o desempenho do pavimento, influenciando a capacidade de aderência dos pneus, a drenagem de água, ruído, a dissipação de água em condições de chuva e a resistência ao rolamento dos veículos (CALLAI, 2011). Geralmente, a macrotextura é avaliada por métodos como o método de mancha de areia, que mede a profundidade média das irregularidades na superfície do pavimento, fornecendo uma medida quantitativa dessa característica. A medida de macrotextura também pode se dar pela drenabilidade, metodologia do perfilômetro a *laser* e o processamento digital de imagens.

Ensaio da Mancha de Areia

O ensaio da mancha de areia é estabelecido por ASTM (1996) e tem por finalidade determinar a profundidade média de areia na superfície, indicando indiretamente as condições de macrotextura. Conforme ABNT (2016), o cilindro preenchido com material granular, com volume de 25.000 mm³, deve ser espalhado em movimentos circulares de maneira uniforme sobre o revestimento e deve-se realizar quatro medições no entorno da circunferência, a fim de calcular o diâmetro médio.

A Figura 3 apresenta o esquema proposto por Mattos (2009), onde a areia é espalhada com o uso do disco padrão normatizado, sendo possível a medição dos diâmetros da mancha (D), e o valor de Hs é sua altura média que será encontrada com o auxílio da Equação 01. A Figura 4 representa o *kit* de ensaio.

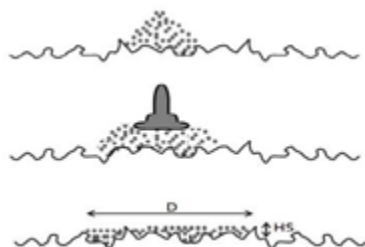


Figura 3. Ensaio de Mancha de Areia (MATTOS,2009). Figura 4. *Kit* do Ensaio da Mancha de Areia (AUTORES, 2024).

Macrotextura e Interação Pneu-Pavimento: Atrito, Ruído e Drenagem

Conforme Moore (1980), a condição da textura da capa de rolamento é o que garante um percurso seguro, devendo atribuir ao revestimento o atrito necessário para isso. O atrito é a força resistente ao movimento interativo entre dois corpos, ele é o atributo que garante a aderência, resistência à derrapagem e a segurança viária em zonas de frenagem, por exemplo. Ao longo da vida útil do pavimento o atrito pode diminuir consideravelmente com o desgaste dos agregados, isto causado pelo próprio tráfego e clima, passando a entregar uma superfície lisa e comprometendo a aderência.

Segundo Hanson *et al.* (2004), o ruído causado pelo tráfego é produzido de diversas formas, dentre as quais destacam-se: o ruído do motor, aerodinâmico e o contato entre o pneu e o pavimento. A textura do revestimento está intrinsecamente ligada à geração de ruído. Essa condição ocorre em função da macrotextura da via e se dá especialmente quando os veículos transitam a velocidades altas ou moderadas (FEHRL, 2006).



DOI: 10.29327/1430212.49-90

AValiação DA MACROTEXTURA EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DISTINTOS PELO MÉTODO DA MANCHA DE AREIA

O princípio fundamental da drenagem superficial em rodovias é a eficiente remoção da água pluvial que se acumula sobre a superfície do pavimento. Essa prática é importante tanto para a preservação da durabilidade estrutural quanto para a garantia de segurança aos usuários, conforme indicado por Ferreira (2002). A macrotextura desempenha um papel essencial neste contexto, ao facilitar o escoamento da água precipitada por meio dos vazios formados entre os grãos do agregado, conforme descrito por Ausserdat (2002).

Influência do Tipo de Revestimento na Macrotextura

O tipo de revestimento é importante na configuração da macrotextura. O ligante asfáltico possui importância indireta e relativa à resistência à desagregação dos revestimentos, para a macrotextura, é a distribuição granulométrica dos agregados que desempenha fator preponderante (APS, 2006). Segundo Bernucci *et al.* (2022), o revestimento é a mais importante de todas as camadas. Para Huang (1993), a escolha do tipo de revestimento asfáltico é um aspecto crítico no projeto de pavimentos, pois afeta diretamente o desempenho, a segurança e a durabilidade das rodovias.

Pavimentos com revestimentos do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA) e Tratamentos Superficiais por Penetração, por exemplo, tendem a apresentar uma macrotextura aberta, uma vez que os agregados de maiores dimensões ficam expostos na superfície. Isso pode ser benéfico para a drenagem, permitindo que a água da chuva escoe facilmente no pavimento, reduzindo o risco de acúmulo de água na superfície. Por outro lado, revestimentos mais densos, como o Concreto Asfáltico (CA), podem ter uma macrotextura mais suave devido à granulometria bem graduada. Isso pode afetar a condução da água de forma diferente e, em casos específicos, pode ser necessário a incorporação de sistemas de drenagem adicionais, como ralos ou canais, para lidar com a água da chuva de maneira eficaz (CALLAI, 2011).

MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição dos Locais de Ensaio

Para o desenvolvimento da pesquisa, fez-se uma seleção prévia das rodovias federais e estaduais que atravessam na cidade de Quixadá e, como requisito para a seleção, as vias deveriam dispor de idades e revestimento asfáltico distintos. Assim, as vias escolhidas, foram a rodovia federal BR-122 e as rodovias estaduais CE-513 e CE-580. É importante ressaltar que no trecho da BR-122, havia um segmento ainda não concluído, apenas na camada *binder*, sendo esta uma camada intermediária caracterizada por possuir uma granulometria mais aberta propositalmente, a fim de baratear o revestimento final. A Tabela 1 apresenta a descrição dos trechos e suas especificidades. Sendo Concreto Asfáltico (CA), Areia Asfalto Usinada à Frio (AAUF) e Tratamento Superficial Duplo (TSD).

Tabela 1. Descrição das rodovias (AUTORES, 2024).

Rodovia	Revestimento	Concluída em	Observações
BR-122	CA (novo e antigo) e <i>binder</i>	2023	Havia um segmento antigo de CA, um segmento novo de CA e um segmento de <i>binder</i> .
CE-513	AAUF	Sem data precisa de conclusão.	A via recebe contínuos serviços de manutenção do tipo tapa buraco, principalmente após o período chuvoso.



Suzane Nogueira da Silva,
 Matheus Chagas Vital, Carlos Bruno da Silva Fernandes,
 Lucas Cavalcante de Almeida, Francisco Heber Lacerda de Oliveira

CE-580

TSD

2021

O segmento estudado apresenta várias manutenções pontuais.

Os trechos foram ensaiados entre os meses de agosto e setembro de 2023, com pontos distribuídos a cada 50 metros percorrendo uma extensão total de 750 metros por trecho. A coleta abrangeu especificamente a trilha de roda externa, sendo o local mais solicitado pelas cargas provenientes dos veículos, visto que sofre influência da presença do acostamento, maior solicitação em zonas de curvas e a tendência de acúmulo das águas pluviais. Para cada rodovia foram coletados 15 pontos de análise intercalando os sentidos do fluxo veicular.

Procedimento do Ensaio da Mancha de Areia e Classificação da Macrotextura

Para a avaliação da macrotextura do pavimento em todas as etapas da pesquisa, foi utilizado o ensaio de mancha de areia, regulamentado por ASTM (1996). O método é estabelecido e normatizado no Brasil pela ABNT (2016). A Tabela 2 descreve a aparelhagem e o processo de execução do ensaio em campo.

Tabela 2. Aparelhagem e Procedimento do Ensaio (Adaptado da ABNT, 2016)

Aparelhagem	Procedimento
Areia natural com mínimo de 90% passante na peneira n°50 e retida na n°100;	Limpar o local escolhido;
Pincel para limpeza da superfície do pavimento;	Encher o cilindro com a areia, de modo a conter o volume de 25.000 mm ³ ;
Cilindro com volume de 25.000 mm ³ ;	Despejar o material granular sobre o pavimento e espalhá-lo em movimentos circulares;
Disco espalhador de base emborrachada com diâmetro entre 60 e 75 mm;	Quando se percebe que a mancha não cresce mais ou que surgiu pontas dos agregados, deve-se interromper os movimentos com o disco;
Régua milimetrada.	Por fim, devem ser feitas quatro medidas do diâmetro defasado entre si em 0°, 45°, 90° e 135°.

A partir das quatro medidas do diâmetro da mancha defasados entre si em 0°, 45°, 90° e 135°, deve-se obter o diâmetro médio (D). A profundidade média da mancha de areia (Hs) da superfície do pavimento deve ser calculada conforme a Equação 1.

$$H_s = 4V\pi D^2 \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde

Hs: Altura média da mancha de areia, expressa em milímetros (mm);

V: Volume do cilindro, expresso em milímetros cúbicos (mm³);

D: Diâmetro médio da área circular coberta pelo material granular, expresso em milímetros (mm).

Com base nos resultados do ensaio, é possível classificar a macrotextura de cada ponto seguindo a Tabela 3, que corresponde a classificação da macrotextura. É recomendado pelo DNIT (2006) que a faixa de valores para a altura média da mancha de areia de 0,6 mm < Hs < 1,2 mm, ou seja, superfícies de pavimentos com textura média a aberta. A Tabela 3 também apresenta as recomendações desenvolvidas por Pasquet (1968) de acordo com a classificação.



DOI: 10.29327/1430212.49-90

AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DISTINTOS PELO MÉTODO DA MANCHA DE AREIA

Tabela 3. Classificação da Macrotextura (Adaptado de DNIT, 2006 e Pasquet, 1968).

Altura média da mancha de areia Hs (mm)	Classificação da macrotextura	Recomendação
$H_s < 0,2$	Muito fina ou muito fechada	Não deve ser utilizado
$0,2 < H_s \leq 0,4$	Fina ou fechada	Indicado para zonas urbanas ($V < 80\text{km/h}$)
$0,4 < H_s \leq 0,8$	Média	Indicado para vias com $80\text{ km/h} < V < 120\text{km/h}$
$0,8 < H_s \leq 1,2$	Grosseira ou aberta	Indicado para vias com $V > 120\text{km/h}$
$H_s > 1,2$	Muito aberta	Indicado em casos especiais (zonas de perigo constante, como longos trechos retos, curvas acentuadas, etc.)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Trecho da Rodovia BR-122 – Revestimento com CA (antigo), CA (recém aplicado) e Binder

A Figura 4 apresenta os resultados da altura da mancha de areia dos pontos ensaiados, incluindo a classificação de cada ponto, de acordo com as classes apresentadas pelo DNIT (2006), bem como as principais texturas encontradas em campo.

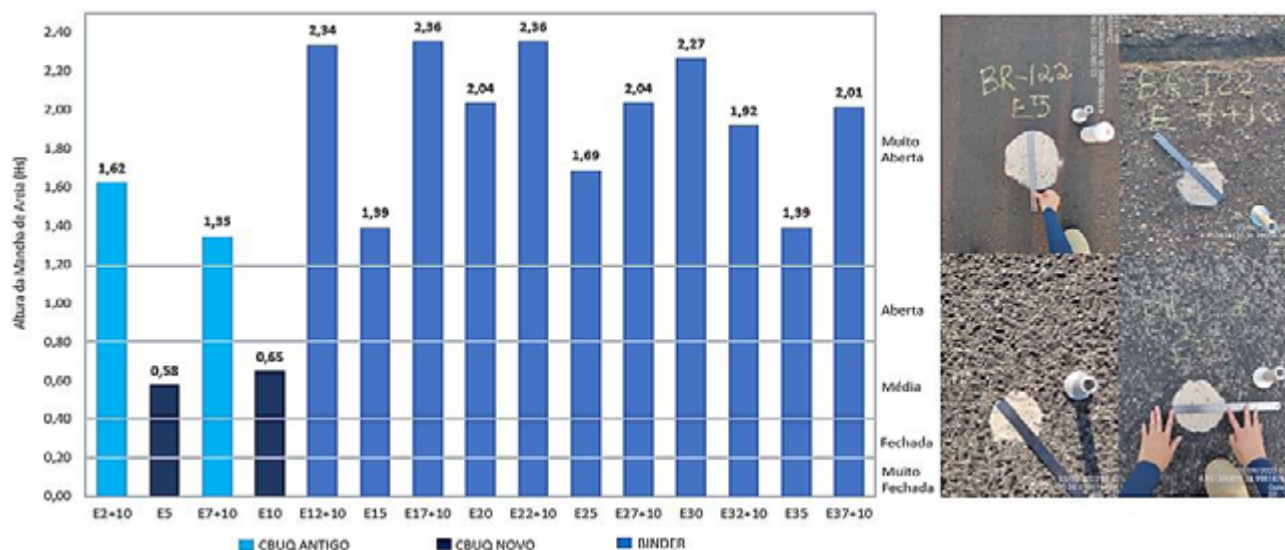


Figura 4. Altura da Mancha de Areia, Classificação da Macrotextura e texturas encontradas em campo – BR-122 (AUTORES, 2024).

Verificou-se que a classe de macrotextura predominante é a muito aberta representando quase 87% dos pontos ensaiados e, somente 13% apresenta uma macrotextura média. A altura média da mancha de areia é de 1,73 mm, classificando o trecho inteiro com macrotextura muito aberta. Segundo Pasquet (1968), essa classificação é indicada em casos especiais, como em zonas de perigo constante, curvas acentuadas e longos trechos retos, não sendo este o caso do segmento da rodovia estudada.

A delimitação recomendada é disposta na Figura 5. Foi observado que somente um ponto estudado, está dentro dos padrões normativos. Isso implica dizer que o revestimento asfáltico do trecho analisado da BR-122 apresenta condições de macrotextura que não atendem às especificações de DNIT (2006).



Suzane Nogueira da Silva,
 Matheus Chagas Vital, Carlos Bruno da Silva Fernandes,
 Lucas Cavalcante de Almeida, Francisco Heber Lacerda de Oliveira

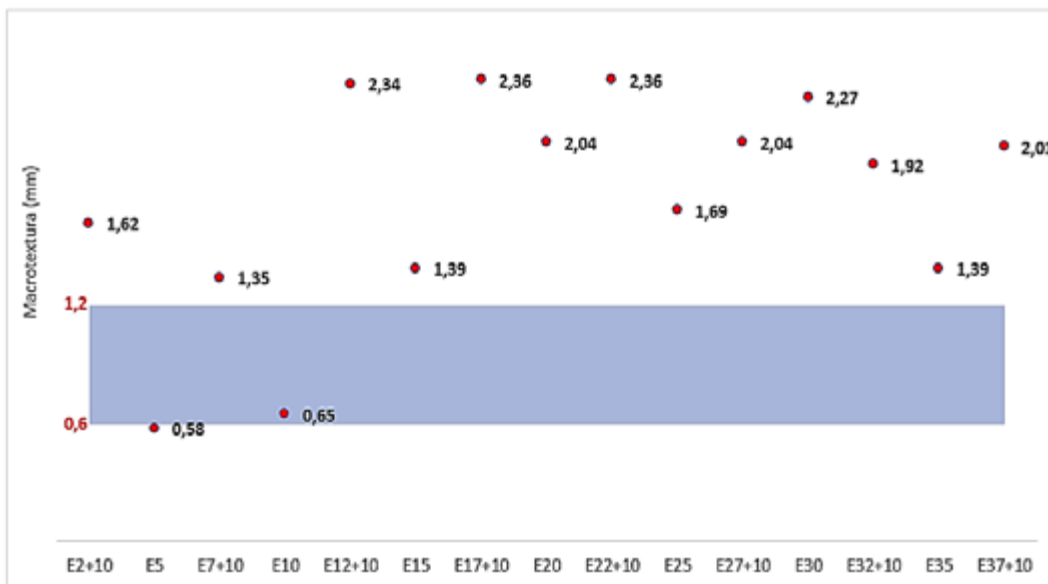
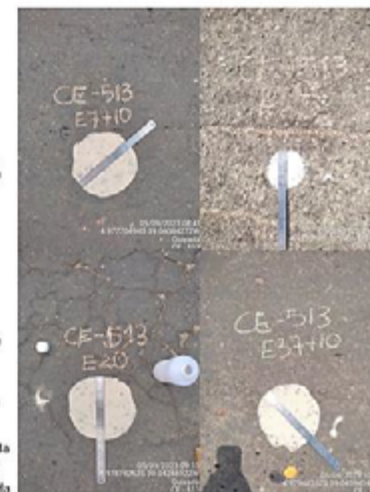
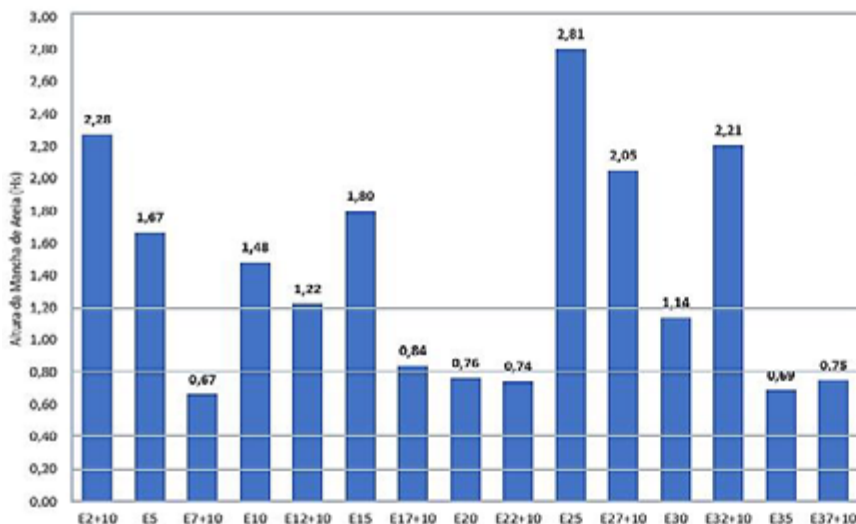


Figura 5. Faixa Limite de Macrotextura Recomendada pelo DNIT (2006) – BR-122 (AUTORES, 2024).

É importante ressaltar que as estacas 2+10 e 7+10 são localizadas no revestimento antigo de CA, possuindo uma classificação muito aberta. Isso ocorre devido à erosão dos agregados menores e desgaste do ligante, resultando em uma exposição de agregados maiores na superfície do revestimento. As estacas 5 e 10, com macrotextura média, foram coletadas da camada de CA nova, sendo esta a única parcela próxima e dentro dos limites normativos. Os demais pontos são todos sobre a camada de binder, justificando a macrotextura aberta, visto que é característico possuir mais vazios e uma granulometria mais aberta propositalmente.

Trecho da Rodovia CE-513 – Revestimento em AAUF

As principais texturas encontradas na CE-513 e a classificação da macrotextura são apresentadas na Figura 6.



DOI: [10.29327/1430212.49-90](https://doi.org/10.29327/1430212.49-90)

AValiação DA MACROTEXTURA EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DISTINTOS PELO MÉTODO DA MANCHA DE AREIA

Figura 6. Altura da Mancha de Areia, Classificação da Macrotextura e texturas encontradas em campo – CE-513 (AUTORES, 2024).

Assim como na BR-122, a classificação da macrotextura muito aberta ocorreu em maior grandeza, com 53,3% da altura da mancha de areia maior que 1,20 mm, apenas 13,3% com classificação aberta e 33,3% classificada com macrotextura média. A altura média da mancha de areia no segmento é de 1,41 mm, caracterizando-o com macrotextura muito aberta, por sua vez, essa textura é indicada para zonas especiais, segundo Pasquet (1968), não sendo o caso do trecho analisado.

Como apresenta-se no gráfico da Figura 7, sete dos quinze pontos ensaiados estão dentro da faixa limitante do DNIT (2006). Desse modo, o trecho não atende às especificações, com mais de 53% dos resultados fora da faixa normativa.

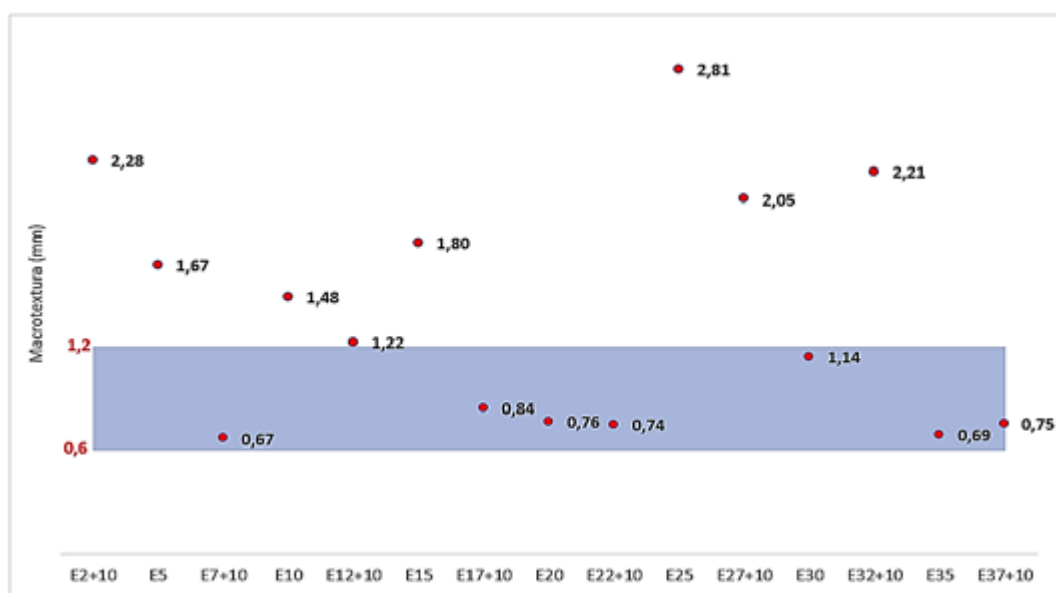


Figura 7. Faixa Limite de Macrotextura Recomendada pelo DNIT (2006) – CE-513 (AUTORES, 2024).

A CE-513 apresenta uma superfície com bastantes remendos por toda sua extensão e periodicamente passa por recuperações do tipo tapa buraco, intensificando o fator mencionado e influenciando diretamente na macrotextura. O revestimento inicial em AAUF não é caracterizado pela presença de agregados graúdos que justifiquem a classificação do trecho. Desse modo, os resultados obtidos podem ser fundamentados na mudança de textura constante devido às restaurações e desgaste do revestimento pelo tráfego e intempéries.

Trecho da Rodovia CE-580 – Revestimento em TSD

Conforme os resultados apresentados na Figura 8, a classe de macrotextura muito aberta é predominante, com 53,3% dos pontos estudados apresentando altura da mancha de areia maior que 1,20 mm, 40% dos pontos estão na faixa de classificação aberta e apenas 6,7% se enquadram na classificação média. A média da altura da mancha de areia no trecho estudado é de 1,42 mm, resultando numa classificação geral muito aberta.



Suzane Nogueira da Silva,
 Matheus Chagas Vital, Carlos Bruno da Silva Fernandes,
 Lucas Cavalcante de Almeida, Francisco Heber Lacerda de Oliveira

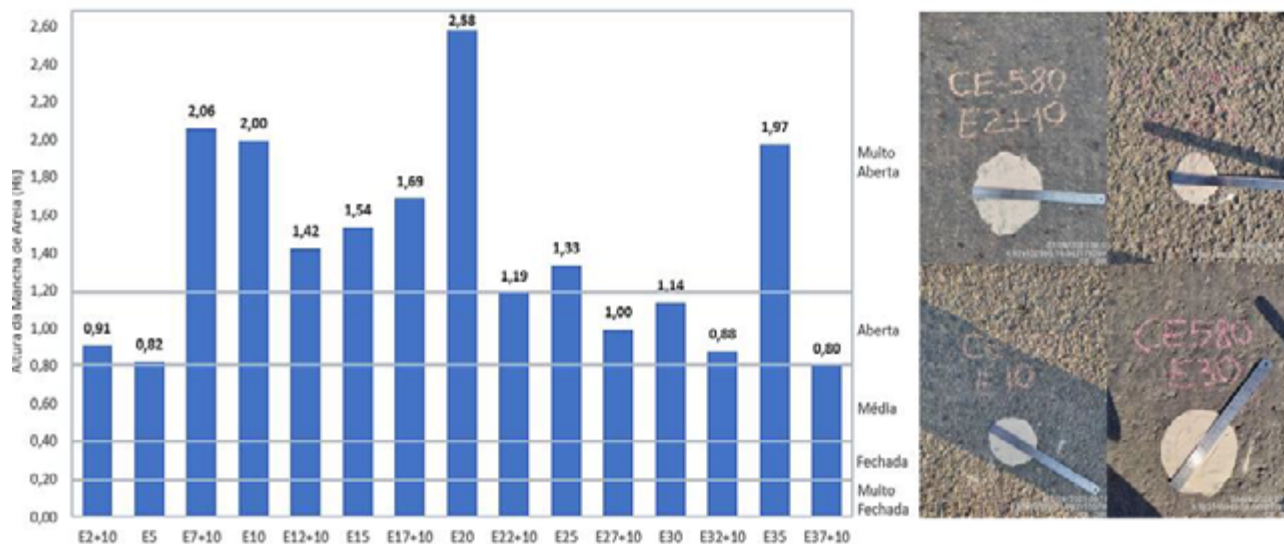


Figura 8. Altura da Mancha de Areia, Classificação da Macrotextura e texturas encontradas em campo – CE-580 (Autores, 2024).

A CE-580 é caracterizada por inúmeras rampas e curvas acentuadas ao longo de todo o percurso estudado, como observado em análises de campo. Esse trecho, situado em uma zona residencial, é considerado pelos moradores locais como particularmente perigoso. Segundo a categorização de Pasquet (1968), essa configuração viária pode ser classificada como especial, na qual se recomenda a implementação de uma macrotextura mais aberta. Tal especificação é sugerida por contribuir significativamente para a segurança dos usuários, proporcionando melhor aderência e drenagem em áreas de alta complexidade geométrica. Contudo, o trecho não atende a faixa limite especificada pelo DNIT (2006), como mostra a Figura 9.

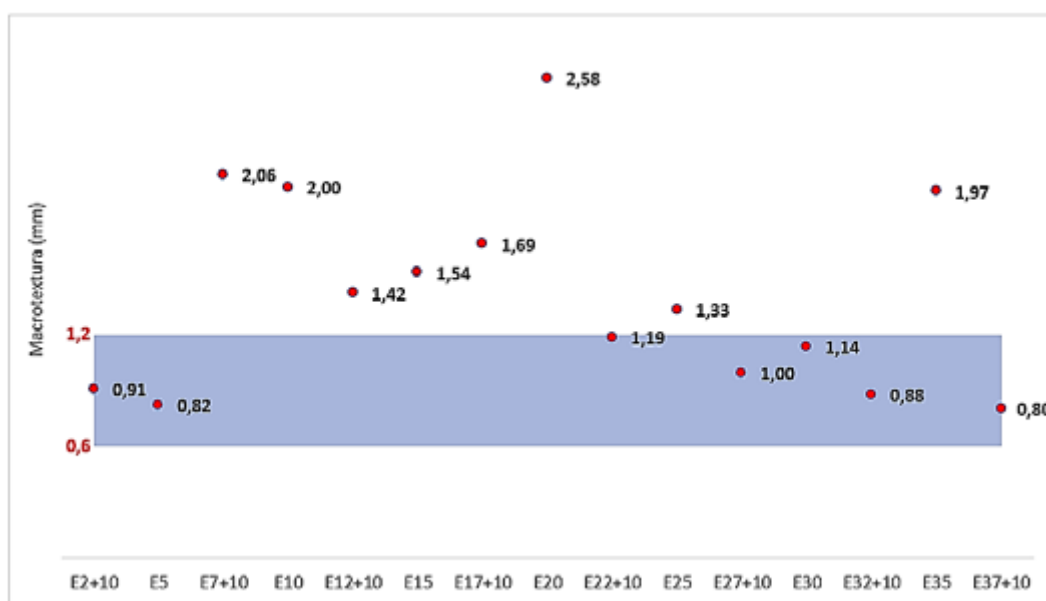


Figura 9. Faixa Limite de Macrotextura Recomendada pelo DNIT (2006) – CE-580 (AUTORES, 2024).



DOI: [10.29327/1430212.49-90](https://doi.org/10.29327/1430212.49-90)

AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS DISTINTOS PELO MÉTODO DA MANCHA DE AREIA

CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a macrotextura dos revestimentos em três rodovias distintas com diferentes tipos de revestimentos asfálticos. O levantamento das condições de macrotextura das rodovias citadas foi feito por meio do ensaio da mancha de areia e os resultados obtidos mostram que a situação atual da macrotextura dos três trechos estudados está fora dos limites sugeridos, com valores de profundidade da mancha de areia superiores a 1,2 mm. Cerca de 65% dos 45 pontos levantados encontram-se na faixa de macrotextura muito grosseira.

Em termos de segurança, a classe de macrotextura aferida nos três tipos de revestimentos analisados é capaz de proporcionar benefícios, contribuindo para uma maior aderência entre os pneus e a pista de rolamento, especialmente em condições adversas. Essa aderência contribui para a redução do risco de aquaplanagem e melhoria da capacidade de frenagem, fatores importantes para prevenir acidentes e promover a segurança viária. No entanto, em termos de conforto, as rodovias analisadas não apresentam resultados adequados, visto que níveis altos de macrotextura podem resultar em ruídos e vibrações excessivas, causando incômodo aos usuários. Além disso, impacta a eficiência operacional dos veículos, com tendência ao aumento no consumo de combustível devido à abrasão acentuada dos pneus.

Por fim, é possível concluir também que a macrotextura do pavimento se deteriora com o tempo, em consequência de diversos fatores, como as intempéries e o desgaste do mástique asfáltico. Além disso, é fundamental realizar o monitoramento temporal da macrotextura para ajustes conforme necessário. Dessa forma, além de proporcionar uma melhor condição superficial durante a vida útil dos pavimentos, contribui simultaneamente com uma infraestrutura rodoviária mais segura, eficiente e confortável.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 16504-16, Misturas asfálticas – Determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria – Método da mancha de areia*. São Paulo: IBP, 2016.

APS, M. *Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos*. Tese – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2006.

ASTM E965-96, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E965-96, Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique*, ASTM International, Pennsylvania, Estados Unidos, 1996.

AUSSEDAT, G. *Aide au choix des couches de roulement vis-a-vis de l'adhérence*. Comité français pour les techniques routieres, França, 2002.

BERNUCCI, L. M.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. *Pavimentação asfáltica - formação básica para engenheiros*. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Petrobrás ABEDA, 2022.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina, 2016.

CAIRNEY, P.; BENNETT, P. (2008) *Relationship between road surface characteristic and crashes on Victorian rural roads*. ARRB conference. Adelaide: Australia, 2008.



Suzane Nogueira da Silva,
Matheus Chagas Vital, Carlos Bruno da Silva Fernandes,
Lucas Cavalcante de Almeida, Francisco Heber Lacerda de Oliveira

CALLAI, S. C. *Estudo do ruído causado pelo tráfego de veículos em rodovias com diferentes tipos de revestimentos de pavimentos*. Dissertação - Curso de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

CNT – *Pesquisa Rodoviária: Relatório Gerencial*. Confederação Nacional do Transporte, Brasília, DF, 2023.

DNIT, *Manual de pavimentação*. Rio de Janeiro, 2006.

FEHRL. S. *Guidance Manual for the Implementation of low -noise road surfaces*. FEHRL. Bélgica, Bruxelas: 2006.

FERREIRA, P. N. *Avaliação da macrotextura de trechos pavimentados de rodovias estaduais situadas na região insular do município de Florianópolis*. Dissertação - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

GOTHIÉ, M.; PARRY, T.; ROE, P. *The relative influence of the parameters affecting road surface friction*. International Colloquium on Vehicle-Tyre Road Interaction. Florencia, Italia, 2001.

HANSON, I.; JAMES, S.; NESMITH, C. *Tire/ Paviment Noise Study*. NCAT - National Center for ASPHALT Technology. Auburn, EUA, 2004.

HUANG, Y. H. *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, 1993.

MATTOS, J. R. G. *Avaliação da Aderência Pneu-Pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR-290/RS*. Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MOMM, L. *Estudo dos efeitos de granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico*. Tese– Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

MOORE, D. F. *Friction and Wear an Rubbers and Tyres*. Wear, vol. 61, 1980.

PULUGURTHA, S. S.; PATEL, K.; KUSAM, P. R. *Pavement macrotexture thresholds to enhance safety: a case study using I-40 data in Durhan County, North Carolina*. Anais do Transportation Research Board (TRB), Washington, D. C., 2011.

ROE, P.; WEBSTER, D.; WEST, G. *The relation between the surface texture of roads and accidents*. Transport Road Research Laboratory, Report 296. Materials and Construction Division. Crowthron, Reino Unido, 1991.

SANTOS, R. T. *Análise da Macrotextura de pavimentos através de processamento de imagens, usando transformada de Fourier*. Dissertação – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2008.



APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINA PARA A DETERMINAÇÃO DA MACROTEXTURA EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM

*Madalena Osório Leite¹;
Carlos Augusto Uchoa da Silva²; Francisco Heber Lacerda de Oliveira²*

RESUMO

A macrotextura é a textura superficial dos pavimentos aeroportuários, crucial para a aderência pneu-pavimento e essencial na drenagem de água para prevenir aquaplanagem. Este estudo tem como objetivo utilizar técnicas de Aprendizado de Máquina para prever a macrotextura das pistas. A metodologia empregada envolveu a coleta de dados de três diferentes aeroportos e a aplicação de modelos de Redes Neurais Artificiais (RNAs). Foram testadas duas arquiteturas de redes neurais, conforme as recomendações de Hecht & Nielsen (1989) e Lippmann (1987), visando comparar a eficácia das diferentes configurações de neurônios na camada intermediária. As análises demonstraram que a modelagem por Aprendizado de Máquina é uma ferramenta válida para entender as variáveis que afetam a macrotextura. O modelo final alcançou uma precisão preditiva de 69%, indicando um desempenho considerável, mas também destacando a necessidade de refinamentos futuros para melhorar a capacidade de previsão e a generalização dos modelos às condições variadas de operação aeroportuária.

PALAVRAS-CHAVE: Macrotextura; Aprendizagem de Máquina; Pistas de Pouso e Decolagem.

ABSTRACT

Macrotexture refers to the surface texture of airport pavements, crucial for tire-pavement adherence and essential in water drainage to prevent hydroplaning. This study aims to use Machine Learning techniques to predict the macrotexture of runways. The methodology involved data collection from three different airports and the application of Artificial Neural Network (ANN) models. Two neural network architectures were tested, following the recommendations of Hecht & Nielsen (1989) and Lippmann (1987), to compare the effectiveness of different configurations of neurons in the intermediate layer. The analyses demonstrated that Machine Learning modeling is a valid tool for understanding the variables affecting macrotexture. The final model achieved a predictive accuracy of 69%, indicating considerable performance but also highlighting the need for future refinements to improve prediction capacity and the models' generalization to varied airport operation conditions.

KEY WORDS: Macrotexture; Machine Learning; Runways.

¹ Universidade de Fortaleza (UNIFOR), madalenaosorioleite@unifor.br.

² Departamento de Engenharia de Transportes, Bloco 703, Campus do Pici, Universidade Federal do Ceará (UFC), heber@det.ufc.br; uchoa@det.ufc.br.



INTRODUÇÃO

A ANAC (2023) determina que o operador de aeródromo deve planejar e executar os serviços de manutenção e reabilitação (M&R) da pista de pouso e decolagem (PPD) e das demais infraestruturas aeroportuárias para manter a sua segurança. O pavimento aeroportuário deve, portanto, cumprir duas funções básicas: conforto ao rolamento e segurança. Tais funções são verificadas por meio da avaliação da condição funcional dos pavimentos, que abrange a análise da irregularidade longitudinal, do atrito, da macrotextura e da ocorrência de defeitos. Para Sales et al. (2021), a aderência efetiva pode ser alcançada por meio do controle da macrotextura e do coeficiente de atrito, combinados com processos de drenagem superficial do pavimento e de remoção do acúmulo de borracha sobre o revestimento.

A profundidade da macrotextura da superfície dos pavimentos aeroportuários é um dos fatores que mais afeta a resistência à derrapagem de aeronaves em superfícies molhadas, pois possibilita maior ou menor perda de energia ao contato com os pneus (Fonseca, 1990). Bernucci *et al.* (2007) afirmam que as condições de aderência dos pavimentos dos aeroportos, representadas pela profundidade da macrotextura, são fundamentais para que se promova a avaliação da situação das superfícies e que se decida sobre as manutenções.

Segundo Géron (2017), a *Machine Learning* (Aprendizagem de Máquina) pode ser aplicada para a resolução de problemas cujas soluções exijam longas listas de regras. Além disso, que estejam em cenários complexos em que não há boas respostas com o uso de abordagens tradicionais em ambientes versáteis ou quando há necessidade de mudanças com certa frequência.

O objetivo do presente artigo é utilizar a Aprendizagem de Máquina para estimar os índices de macrotextura, em pistas de pouso e decolagem. Foi utilizado o banco de dados de três pistas que pertencem ao Aeroporto Internacional de Salvador Luís Eduardo Magalhães, ao Aeroporto Internacional de Belém e ao Aeroporto Internacional de Porto Alegre Salgado Filho.

REFERENCIAL TEÓRICO

Macrotextura

A macrotextura, segundo Bernucci et al. (2007), é a textura associada à rugosidade do conjunto masticado asfáltico e agregados. Para Rodrigues Filho (2006), a macrotextura é representada pela altura média, em mm, do relevo da superfície. Segundo Oliveira (2016), a macrotextura é o principal responsável pela drenagem ativa da água da superfície dos pavimentos aeroportuários. Existe a preocupação com relação à impregnação de borracha, já que esse contaminante pode preencher as ranhuras e não permitir o adequado escoamento da água, favorecendo os eventos de aquaplanagem.

O ensaio da mancha de areia é utilizado para a medição da textura superficial de pavimentos. Consiste no espalhamento uniforme de um volume conhecido de areia sobre uma área da superfície do pavimento da pista de pouso e decolagem e na determinação da distância média entre os picos e vales da macrotextura do pavimento (profundidade da macrotextura) mediante a divisão do volume



DOI: [10.29327/1304307.48-1](https://doi.org/10.29327/1304307.48-1)

APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINA PARA A DETERMINAÇÃO DA MACROTEXTURA EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM

de areia utilizado pela área de espalhamento (ANAC, 2023). No Brasil, este ensaio é normalizado por ABNT (2016). A medição de macrotextura, segundo ANAC (2023), deve ser feita em toda a extensão operacional da PPD e de forma alternada a cada 100 m, à esquerda e à direita do eixo, com, no mínimo, três medições para cada área. Após o cálculo da profundidade média da macrotextura de cada terço da pista, o operador do aeródromo deve classificar os resultados, devendo a profundidade média da macrotextura ser igual ou superior a 0,60 mm.

ANAC (2023) indica que a profundidade média da macrotextura deve ser maior ou igual a 0,60 mm para uma PPD e que, no caso de valores inferiores, o operador de aeródromo deve informá-la de quais ações serão tomadas para aumentar esse valor e garantir a segurança das operações. ICAO (2002) recomenda que a profundidade média da macrotextura de pavimentos novos não seja inferior a 1 mm, pois esse valor proporciona boas características de atrito em condições de pista molhada. Valores de profundidades inferiores a 1 mm podem proporcionar uma boa drenagem para pista, mas recomenda-se o uso de valores altos, pois a sua superfície da pista se deteriorará com o tempo de operação.

A segurança e eficiência das operações aeroportuárias dependem de uma variedade de fatores, desde a manutenção adequada das pistas até o uso de tecnologias inovadoras para otimizar processos. Nesse sentido, é crucial considerar não apenas os padrões regulatórios estabelecidos para garantir a integridade das superfícies de pouso, como também explorar novas abordagens que possam aprimorar a gestão e segurança das instalações aeroportuárias. Ao mesmo tempo, avanços significativos têm sido feitos no campo da ciência da computação, especialmente na Aprendizagem de Máquina, oferecendo oportunidades empolgantes para aprimorar a eficiência e a tomada de decisões em ambientes aeroportuários.

Aprendizagem de Máquina (*Machine Learning*)

A Aprendizagem de Máquina, também chamada de Machine Learning, é um campo da ciência da computação que se destaca por sua capacidade de desenvolver algoritmos e modelos capazes de aprender e tomar decisões com base em dados. Conforme mencionado por Mitchell (1997), a principal ideia por trás do Machine Learning é construir sistemas que possam se adaptar e aprender com a experiência, melhorando seu desempenho ao longo do tempo. Os algoritmos da Aprendizagem de Máquina têm a habilidade de identificar padrões complexos nos dados e generalizá-los para realizar previsões e tomar decisões.

A Aprendizagem de Máquina, com sua capacidade de automatizar decisões a partir de dados, é destacada pela diversidade de suas aplicações, como reconhecimento de padrões e análise de dados. Segundo Géron (2017), ela se divide em categorias como supervisionada, onde algoritmos aprendem de dados rotulados para fazer previsões, e não supervisionada, que identifica padrões ocultos sem orientação específica. Este campo evoluiu rapidamente, abrindo novos caminhos para a inovação e eficiência em diversos setores.

Já as redes neurais artificiais são técnicas de Aprendizagem de Máquina inspiradas no funcionamento do cérebro humano. Para tanto, são utilizados sistemas paralelos distribuídos compostos por unidades de processamento simples, chamados de nodos, que calculam determinadas



funções matemáticas, em geral não lineares. Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas que são interligadas por um expressivo número de conexões (Ribeiro, 2013).

APLICAÇÃO DA MODELAGEM NEURAL

Por meio da utilização de Redes Neurais Artificiais (RNAs), mais especificamente a arquitetura de Redes de Múltiplas Camadas (MLP), foram analisados os dados relativos aos parâmetros de aderência, provenientes das pistas aeroportuárias, para investigar a complexidade do índice de macrot textura das superfícies das pistas de pouso e decolagem.

Para a aplicação da Modelagem Neural a determinação do número ideal de neurônios na camada intermediária de uma arquitetura é uma consideração crucial para otimizar a eficácia do modelo. Duas abordagens distintas, propostas por Hecht & Nielsen (1989) e Lippmann (1987), oferecem diretrizes para essa questão. Hecht & Nielsen (1989) recomendam que a camada intermediária contenha o dobro mais um de neurônios em relação ao número de variáveis de entrada. Lippmann (1987) propõe que a quantidade de neurônios na camada intermediária seria determinada pela multiplicação do número de saídas pelo número de neurônios de entrada, acrescido de um. A Figura 1 mostra as etapas da aplicação.

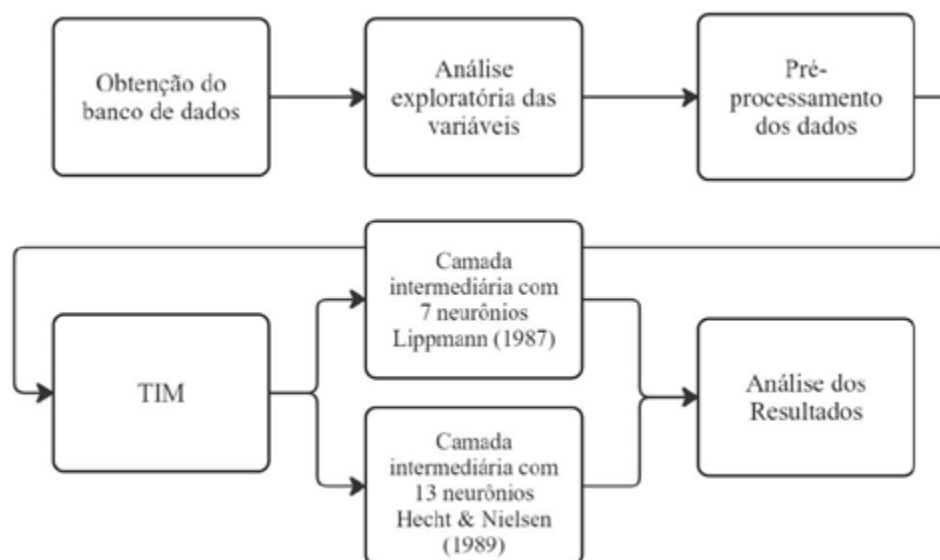


Figura 1. Etapas da aplicação da Rede Neural

O fluxograma descreve o processo de desenvolvimento e avaliação de uma rede neural para a análise de dados. O processo inicia com a obtenção do banco de dados, seguida por uma análise exploratória das variáveis para entender as características dos dados. Em seguida, ocorre o pré-processamento dos dados para prepará-los para a modelagem, incluindo normalização ou padronização, tratamento de valores ausentes e conversão de variáveis categóricas. A definição da arquitetura da rede neural é realizada usando a ferramenta *Network Fitting (Nftool)*. O diagrama mostra duas ramificações que diferem na configuração da camada intermediária: uma com 7 neurônios, conforme proposto por Lippmann em 1987, e outra com 13 neurônios, conforme sugerido por Hecht & Nielsen em 1989. O processo é concluído com a análise dos resultados.



DOI: 10.29327/1304307.48-1

APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINA PARA A DETERMINAÇÃO DA MACROTEXTURA EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM

Obtenção do banco de dados

Para este estudo, foram utilizados dados secundários provenientes de bancos de dados de três pistas aeroportuárias distintas. As pistas analisadas estão localizadas no Aeroporto Internacional de Salvador Luís Eduardo Magalhães, no Aeroporto Internacional de Belém e no Aeroporto Internacional de Porto Alegre Salgado Filho.

A técnica de modelagem escolhida foi a utilização de Redes Neurais Artificiais (RNAs), mais especificamente a arquitetura de Redes de Múltiplas Camadas (MLP), com camada única, contendo o número mínimo de neurônios necessário para a tarefa. Essa seleção baseia-se na capacidade das RNAs de lidar com a complexidade inerente a previsão do índice de macrotextura em pistas de pouso e decolagem. Trata-se de um modelo de aprendizado supervisionado, especificamente projetado para realizar tarefas de regressão, que envolve variáveis contínuas e a necessidade de prever valores numéricos para o índice mencionado.

Análise exploratória das variáveis

No contexto de modelagem e previsão utilizando redes neurais, é necessário entender as características e interações entre as variáveis envolvidas. Antes de avançar para o treinamento de modelos, é crucial identificar multicolinearidade entre variáveis preditoras, pois isso pode afetar a estabilidade e a interpretabilidade do modelo. Redes neurais podem discernir padrões complexos e não-lineares; no entanto, a presença de alta correlação entre variáveis preditoras pode reduzir a precisão das previsões. Além disso, é importante reconhecer que a correlação entre variáveis não estabelece uma relação causal. Conclusões sobre causalidade devem ser baseadas em conhecimento do domínio específico. A Tabela 1 mostra o *dataset* com todas as variáveis disponíveis.

Tabela 1. Trecho da planilha de dados coletados antes da análise exploratória.

ID	Variável de entrada 1	Variável de entrada 2	Variável de entrada 3	Variável de entrada 4	Variável de entrada 5	Variável de entrada 6	Variável de entrada 7	Variável de entrada 8	Variável de saída
ID	Distância	Pista	Lado	Terço	Dias_Remocao_anterior	Data_Remocao	Data_medicao	Ano	Valor_Macrotextura ESPERADO
1	0	1	0	1	96	19/06/2015	23/09/2015	2015	0,61
2	100	1	1	1	96	19/06/2015	23/09/2015	2015	0,49
3	200	1	0	1	96	19/06/2015	23/09/2015	2015	0,42
4	300	1	1	1	96	19/06/2015	23/09/2015	2015	0,51
5	400	1	0	1	96	19/06/2015	23/09/2015	2015	0,52
1490	1800	3	1	3	231	09/10/2020	28/05/2021	2021	1,51
1491	1900	3	0	3	231	09/10/2020	28/05/2021	2021	1,49
1492	2000	3	1	3	231	09/10/2020	28/05/2021	2021	1,49
1493	2100	3	0	3	231	09/10/2020	28/05/2021	2021	1,14
1494	2200	3	1	3	231	09/10/2020	28/05/2021	2021	1,72

A análise da correlação entre variáveis foi realizada utilizando o coeficiente de correlação de Pearson. Essa abordagem permitiu determinar se as variáveis estão correlacionadas positiva ou negativamente, ou se não há relação aparente entre elas. Os resultados dessa análise estão apresentados na Figura 2, onde foram identificados padrões de comportamento. Essa análise é crucial para a seleção das variáveis mais relevantes para o treinamento de redes neurais, além de auxiliar na detecção de possíveis problemas de multicolinearidade, os quais podem afetar a precisão e a interpretação dos modelos resultantes.

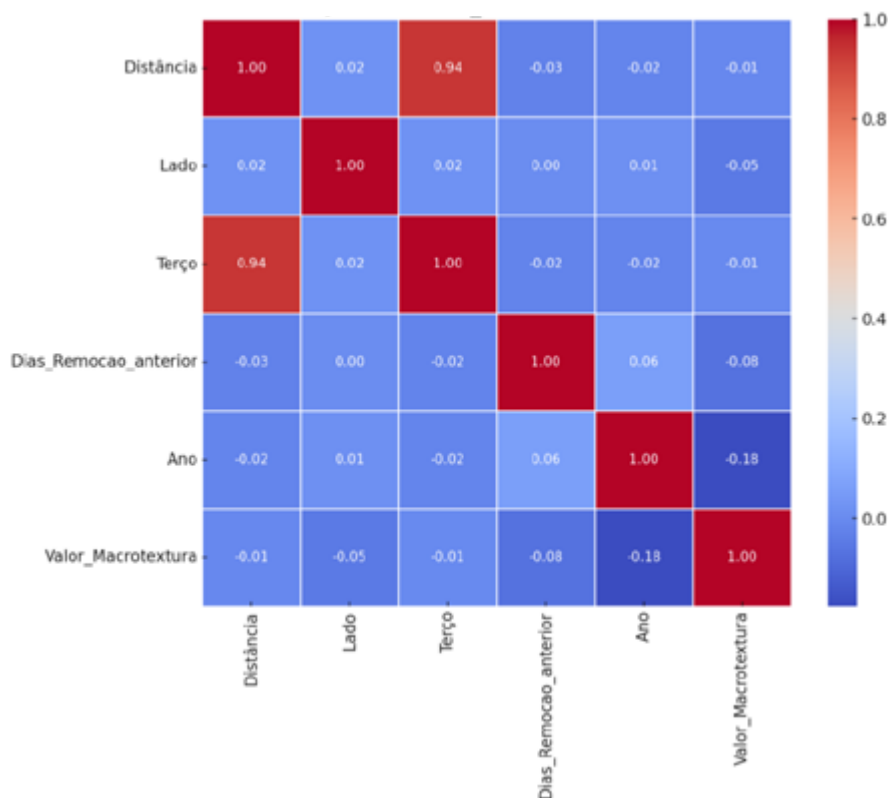


Figura 2. Matriz de correlação das variáveis numéricas.

Na análise dos dados sobre as condições de macrotextura das pistas de aeroportos, construiu-se uma matriz de correlação para examinar as relações entre variáveis numéricas. A matriz de calor revela correlações significativas, destacando-se a relação entre as variáveis Distância e o Terço (da pista), que apresenta um coeficiente elevado, indicando uma forte dependência linear entre essas variáveis, ambas marcadoras de locais específicos ao longo da pista.

A variável Valor_macrotectura, por outro lado, mostrou correlações negativas com as demais variáveis, indicando que influências mais sutis ou não lineares podem estar afetando esta métrica de textura da superfície. Adicionalmente, a correlação mínima entre Ano da medição e as outras variáveis sugere que as alterações temporais anuais têm pouco impacto direto nas condições observadas, refletindo uma possível estabilidade nas práticas de manutenção e nas características construtivas ao longo do tempo.

Apesar das correlações identificadas, todas as variáveis serão incorporadas na análise das condições de macrotextura das pistas de aeroportos. Essa abordagem completa permitirá uma compreensão mais ampla dos fatores que afetam as condições das pistas. Assim, mesmo com a correlação negativa leve de Valor_macrotectura com outras variáveis, todas serão consideradas para assegurar uma avaliação precisa e abrangente das condições das pistas de aeroportos.

Após a análise de correlação, essa estrutura de dados categorizados foi tratada através da técnica de *dummyização*, onde cada variável foi convertida em representações numéricas. No caso de Nome da

DOI: [10.29327/1304307.48-1](https://doi.org/10.29327/1304307.48-1)

APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINA PARA A DETERMINAÇÃO DA MACROTEXTURA EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM

pista, três variáveis binárias distintas seriam criadas para representar cada valor único (1, 2, 3). Para Lado da pista, uma única variável binária foi utilizada, representando os dois valores possíveis (0 ou 1). Por fim, para Terço da pista, três variáveis binárias foram criadas para cada valor único (1, 2, 3). Os nomes das seis variáveis foram revisados no conjunto de dados para facilitar sua compreensão. Essa revisão foi realizada com o objetivo de tornar mais fácil o entendimento e a interpretação das variáveis no modelo de rede neural.

Pré-processamento dos dados

O processo de pré-processamento do conjunto de dados foi conduzido por meio de um script (código m) implementado no Matlab. Inicialmente, os dados foram lidos a partir de um arquivo gerado no software Excel, onde os dados ocuparam as células de B3 à H1496. Essa leitura resultou na formação de um *dataset*, o qual foi reordenado aleatoriamente para introduzir uma ordem de embaralhamento, visando evitar possíveis vieses nos padrões usados na modelagem.

Posteriormente, a etapa de normalização Min-Max foi aplicada ao *dataset*. Essa técnica foi empregada para normalizar as variáveis, exceto a coluna 7 (saída), trazendo-as para uma faixa comum de valores entre 0 e 1. Após a normalização, o *dataset* foi dividido em dois conjuntos mutuamente exclusivos: um conjunto de treinamento e um conjunto de teste. Assim, 70% dos dados foram alocados para o conjunto de treinamento, enquanto 30% foram destinados ao conjunto de teste, como pode ser observado na Figura 3.

```

1
2 % Ler o arquivo Excel
3 dataset = xlsread('Dadosadadlena.xlsx', 1, 'B3:H1496');
4
5 % Criar uma ordem aleatória no conjunto de dados (embaralhar)
6 randomOrder = randperm(size(dataset, 1));
7 dataset = dataset(randomOrder, :);
8
9 % Aplica a normalização Min-Max
10 colsToNormalize = 1:size(dataset, 2);
11 colsToNormalize(colsToNormalize == size(dataset, 2)) = [];
12 colsToNormalize(colsToNormalize == 7) = [];
13 dataset(:, colsToNormalize) = (dataset(:, colsToNormalize) - min(dataset(:, colsToNormalize))) ./ (ma
14
15 % Separar em 2 conjuntos de dados mutuamente exclusivos
16 numRows = size(dataset, 1);
17
18 % 70% dos dados para treinamento
19 numTrain = round(0.7 * numRows);
20
21 % Conjunto de treinamento
22 treinamento = dataset(1:numTrain, :);
23
24 % Conjunto de teste
25 teste = dataset(numTrain+1:end, :);
26
27 % Dividir cada conjunto em dois subconjuntos
28
29 % Colunas B até G
30 entradaTreinamento = treinamento(:, 1:end-1);
31
32 % Coluna H

```

Figura 3. Janela de comando do Matlab para o pré-processamento dos dados.

Cada um desses conjuntos foi ainda subdividido em duas partes distintas. No conjunto de treinamento, as colunas de B até G foram separadas para representar as entradas do modelo, enquanto a coluna H foi isolada para representar a variável de saída esperada. O mesmo procedimento foi realizado para o conjunto de teste, garantindo consistência entre os subconjuntos e permitindo a correta alimentação do modelo com os dados de entrada e de saída para fins de treinamento e validação.



Definição da Arquitetura da Rede Neural Neural

A determinação do número ideal de neurônios na camada intermediária de uma arquitetura neural é crucial para a eficácia do modelo. Diferentes abordagens propostas por Hecht & Nielsen (1989) e Lippmann (1987) oferecem orientações sobre essa questão.

A partir do que disse Lippmann (1987) foi realizada uma abordagem baseada na relação entre o número de variáveis de entrada e a saída desejada. De acordo com esta teoria, a quantidade de neurônios na única camada intermediária seria dada pela multiplicação do número de saídas pelo número de neurônios de entrada somado com um. Considerando uma saída e seis variáveis de entrada, a arquitetura recomendada resultaria em 7 neurônios na camada intermediária, resultando em uma rede com a arquitetura 6:7:1 (Figura 4).

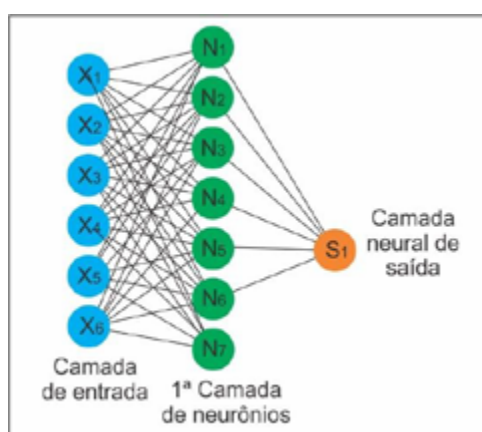


Figura 4. Proposta de Rede Neural a partir de Lippmann (1987).

Seguindo as recomendações de Hecht & Nielsen (1989), estabeleceu-se outra estrutura da camada intermediária sugerindo que esta deva conter o dobro mais um de neurônios em relação ao número de variáveis de entrada. Por exemplo, para o índice de macrotextura, composto por seis variáveis de entrada, a arquitetura proposta resultaria em 6:13:1 neurônios. Posteriormente à definição dessas diretrizes para a estrutura da camada intermediária da rede neural, foram elaboradas as arquiteturas completas.

Neural Network Fitting (Nftool) com 1 camada intermediária

Após o código aplicado no Matlab, vem a utilização do Nftool, uma ferramenta disponível no Matlab para configurar e treinar redes neurais. Através de sua interface, é possível definir a estrutura da rede, como o número de camadas e neurônios, escolher as funções de ativação e os algoritmos de treinamento. Além disso, viabiliza a divisão do conjunto de dados para treinamento e validação. Essa ferramenta simplifica o processo de criação de redes neurais.

No primeiro treinamento foi usada a configuração da rede como 6:7:1. Os conjuntos de dados de entrada e saída foram adequadamente formatados e integrados à ferramenta, possibilitando a configuração e execução do processo de treinamento. Na definição dos parâmetros da rede, o número de camadas intermediárias ficou de 7 neurônios e funções de ativação. O resultado do

DOI: [10.29327/1304307.48-1](https://doi.org/10.29327/1304307.48-1)

APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINA PARA A DETERMINAÇÃO DA MACROTEXTURA EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM

primeiro teste mostrou um percentual de avaliação de 46% (Figura 5), o que não é um bom resultado. Espera-se um valor superior a 80%.

	Observations	MSE	R	
Training	732	0.1801	0.5836	
Validation	157	0.1985	0.4586	
Test	157	0.1498	0.6018	

Figura 5. Tela do Matlab com o percentual de validação para a Rede 6:7:1.

Como o percentual de validação do primeiro teste não foi satisfatório, foi necessário explorar diferentes arquiteturas de redes neurais para melhorar o desempenho do modelo. Durante esse processo, foram realizadas iterações para ajustar a rede neural, com o objetivo de aprimorar sua capacidade de generalização e adaptabilidade aos padrões presentes nos conjuntos de dados. As simulações realizadas com uma quantidade maior de neurônios na camada intermediária resultaram em desempenho inferior em comparação com a configuração que continha 7 neurônios.

A análise passa então a ser conduzida com base nas recomendações de Hecht & Nielsen (1989), ajustando a estrutura da rede neural de acordo com suas orientações. Isso implica testar uma configuração com 13 neurônios na camada intermediária, conforme indicado por essa abordagem. Os resultados obtidos com essa nova configuração estão na Figura 6.

	Observations	MSE	R	
Training	889	0.1412	0.6880	
Validation	157	0.1330	0.6895	
Test	0	NaN	NaN	

Figura 6. Tela do Matlab com o percentual de validação para a Rede 6:13:1.



Após realizar o ajuste na rede neural, configurando-a para operar com uma única camada composta por 13 neurônios, o resultado obtido demonstrou um desempenho de validação de 69%.

ANÁLISES E DISCUSSÕES

Os resultados dos gráficos revelaram uma performance aquém do esperado durante a análise do modelo. Embora o desempenho da rede neural não tenha atingido as expectativas iniciais, também não pode ser considerado como insatisfatório.

Para avaliar a eficácia da rede neural proposta por Hecht & Nielsen (1989), com 13 neurônios na camada intermediária, foram elaborados a Matriz de confusão e o Gráfico de performance do modelo. Através desta análise, será possível entender melhor a capacidade de classificação do modelo e sua eficiência em termos de aprendizado e generalização.

A análise da matriz de confusão revela que o modelo apresenta uma alta precisão global, especialmente na identificação da classe 1. No entanto, a falta de detecção de verdadeiros negativos e a ocorrência de falsos positivos para a classe 0 sugerem um desequilíbrio no tratamento das classes, possivelmente devido a um desbalanceamento nos dados de treinamento ou uma inclinação do modelo para a classe mais comum. Recomenda-se revisar o balanceamento das classes no conjunto de dados de treinamento e ajustar a sensibilidade do modelo para melhorar sua precisão na identificação da classe 0. A Figura 7 mostra a Matriz de confusão.

Output Class \ Target Class	0	1	
0	0 0.0%	9 2.0%	0.0% 100%
1	0 0.0%	439 98.0%	100% 0.0%
	NaN% NaN%	98.0% 2.0%	98.0% 2.0%

Figura 7. Matriz de confusão do modelo.

O gráfico da Figura 8 mostra o desempenho de uma rede neural durante o treinamento, validação e teste ao longo de 23 iterações. Observa-se que o erro quadrático médio (MSE) para o conjunto de

DOI: [10.29327/1304307.48-1](https://doi.org/10.29327/1304307.48-1)

APLICAÇÃO DA APRENDIZAGEM DE MÁQUINA PARA A DETERMINAÇÃO DA MACROTEXTURA EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM

treinamento (linha azul) e validação (linha verde) diminui significativamente no início e depois se estabiliza, indicando que o modelo converge de maneira eficaz. O erro no conjunto de teste (linha vermelha) segue um padrão semelhante, o que sugere que o modelo está generalizando bem, uma vez que as linhas de validação e teste permanecem próximas após a estabilização. O ponto marcado com um círculo verde destaca o melhor desempenho de validação, que ocorre na iteração 17, com um MSE de 0.2086.

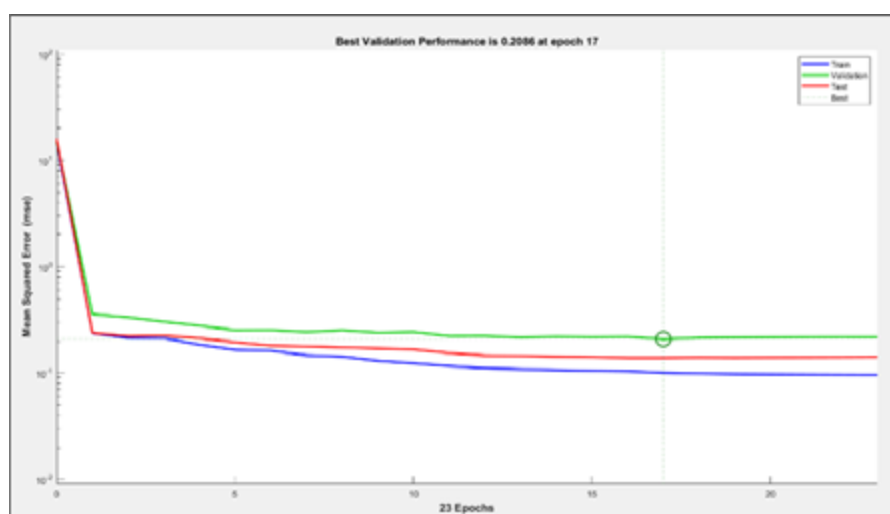


Figura 8. Performance do modelo

A iteração que marca o melhor desempenho de validação é crucial, pois sugere o momento ideal para cessar o treinamento e evitar o *overfitting*, assegurando que o modelo generalize bem para dados novos. Após este ponto, treinamentos adicionais podem não melhorar e até degradar o desempenho em dados desconhecidos. Esse fenômeno é evidenciado pelo fato de que as curvas de validação e teste permanecem estáveis e próximas uma da outra mesmo após a iteração 17, demonstrando que o modelo alcançou uma capacidade ótima de generalização sem memorizar os dados de treinamento.

CONCLUSÕES

A investigação sobre aderência pneu-pavimento em pistas de pouso e decolagem, conduzida por meio de técnicas de Aprendizado de Máquina, especialmente o uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs), destacou desafios significativos na previsão dos índices de macrotextura. Após análise e modelagem, o desempenho máximo alcançado para o conjunto de teste foi de 69%, revelando uma limitação na capacidade preditiva do modelo em relação a esses índices.

Esta avaliação técnica sugere uma necessidade urgente de refinamentos adicionais na estrutura do modelo. Um caminho viável envolve uma revisão detalhada das variáveis de entrada, considerando a exclusão seletiva de variáveis que contribuem de forma limitada para o modelo. Essa abordagem permitiria a inclusão de outras variáveis mais significantes para a explicação do fenômeno em questão.



Aprofundar a análise de correlações entre variáveis é crucial. Identificar relações lineares fortes ou redundâncias entre algumas delas pode resultar em um refinamento substancial do modelo. Embora os resultados atuais não tenham atendido às expectativas, a exploração deste estudo proporcionou insights e estabeleceu uma base sólida para futuros trabalhos.

Nesse sentido, a continuação desta pesquisa implica em buscar mais dados e refinar a modelagem para aprimorar a precisão preditiva do modelo. Incorporar novos parâmetros ou reavaliar as variáveis existentes é fundamental para estabelecer um modelo mais robusto e confiável para a previsão dos índices de macrot textura em pistas de pouso e decolagem, contribuindo para a segurança e eficiência operacional dos aeródromos.

REFERÊNCIAS

- ANAC (2023). Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Nº 153, de 14 de abril de 2023. Agência Nacional de Aviação Civil. Secretaria de Aviação Civil. Brasília, DF.
- BERNUCCI, L. B.; MOTA, L. M. G.; CERATI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2007). Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro : Petrobrás.
- FONSECA, O. A. (1990). Manutenção de Pavimentos de Aeroportos. Brasília: Diretoria de engenharia da Aeronáutica. Divisão de Estudos e Projetos de Infraestrutura. Ministério da Aeronáutica.
- GÉRON, A. (2017). Hands-on machine learning with Scikit-Learn and TensorFlow : concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. Sebastopol, CA: O'Reilly Media. ISBN 978-1491962299.
- ICAO (2002) Manual de servicios de aeropuertos. Parte 2. Estado de la superficie de los pavimentos. Cuarta edición. Organización de Aviación Civil Internacional. Lima, Peru.
- MITCHELL, T. M. Machine learning. New York, NY: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1997. 432 p. ISSN 03600300. ISBN 0070428077.
- OLIVEIRA, F. H. L. (2016). Desenvolvimento de um modelo de gerenciamento de pavimentos aeroportuários como apoio à tomada de decisão sobre estratégias de manutenção e reabilitação. 179f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- RIBEIRO, A. J. A. Um método para localização e estimação das características geotécnicas dos solos da Região Metropolitana de Fortaleza-CE para fins de pavimentação. 2013. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- RODRIGUES FILHO, O. S. (2006) Características de Aderência de Revestimentos Asfálticos Aeroportuários – Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- SALES, R. S.; OLIVEIRA, F. H. L. de; PRADO, L. A. (2021). Performance of tire-asphalt pavement adherence according to rubber removal on runways. INTERNATIONAL JOURNAL OF PAVEMENT ENGINEERING 2022, VOL. 23, NO. 10, 3566–3576 <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1907577>.



GESTÃO DE PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS: UMA ABORDAGEM COM TECNOLOGIA DE MONITORAMENTO

Rodrigo Santos Colares¹; Esther Ribeiro Júlio¹ & Letícia Gonçalves Costa Munhoz¹

RESUMO

Nos períodos chuvosos ocorrem muitas interrupções no fluxo de veículos devido a pontos críticos nas rodovias. Com o intuito de melhorar a gestão desses pontos críticos e dar maior transparência a população, o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais (DER-MG) desenvolveu no final de 2023 e início de 2024 uma plataforma digital que permite o cadastro e monitoramento georreferenciado desses. Este artigo pretende demonstrar a experiência da autarquia com essa plataforma. O cadastro dos pontos críticos ocorreu por meio de um aplicativo que funciona online e offline, em que as 40 Unidades Regionais do DER-MG realizou o cadastro e a atualização do status desses pontos. Após esse cadastro, as informações foram para um painel online, que possibilita a visualização tanto pela alta gestão do órgão, como pelas áreas técnicas, e pelos cidadãos. O painel público, foi disponibilizado no site institucional da autarquia em abril de 2024, e proporcionou maior transparência e participação da população nas ocorrências. A implementação dessa tecnologia na gestão de pontos críticos, permitiu a obtenção de uma visão mais ampla sobre as ocorrências em todo o estado, a construção de uma série histórica rodoviária, como também simplificou o processo de diagnóstico dos pontos, possibilitando uma maior eficácia na tomada de decisão da alta gestão do órgão, maior celeridade na resolução e maior segurança dos usuários.

PALAVRAS-CHAVE: pontos críticos; rodovias; fluxo de tráfego; monitoramento; interrupções.

ABSTRACT

During rainy periods, there are many interruptions in the flow of vehicles due to critical points on the highways. In order to improve the management of these critical points and provide better transparency to the population, the Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais (DER-MG) developed in January 2024 a digital platform that allows their registration and monitoring. This article aims to demonstrate the experience of the department with this platform. The registration of critical points occurred through an application that works online and offline, in which the 40 Regional Units of DER-MG registered and updated the status of critical points. After registration, the information went to an online dashboard, which allows viewing by both senior government management, technical areas, and citizens. The public dashboard was made available on the department's institutional website in April of 2024 and provided better transparency and public participation in incidents. The implementation of this technology in the management of critical points allowed obtaining a broader view of occurrences throughout the state, the construction of a road historical series, as well as simplifying the process of diagnosing points, enabling better efficiency in taking decision by the department's top management, faster resolution and safety to the population.

KEY WORDS: critical points; highways; flow of vehicles; monitoring; interruptions.

¹ Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG), rodrigo.colares@der.mg.gov.br; esther.ribeiro@der.mg.gov.br; leticia.munhoz@der.mg.gov.br



INTRODUÇÃO

As rodovias desempenham um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social de uma região, constituindo importantes vias de transporte para pessoas e mercadorias. O transporte rodoviário, embora seja o modal mais utilizado no Brasil, também é marcado por grandes desafios como o alto custo de manutenção e os acidentes rodoviários (CUNHA, 2018). De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS) esses acidentes representam uma das principais causas de mortes no mundo, e geram custos operacionais elevados, decorrentes do aumento do tempo de viagem, do consumo de combustível e da manutenção dos veículos (OLIVEIRA; FILHO; LIMA, 2023).

Nesse cenário, os pontos críticos rodoviários tornam-se elementos de extrema importância, representando áreas vulneráveis que perturbam o fluxo regular do tráfego e colocam em risco a segurança dos usuários (WOLSHON; PANDE, 2016). Essas áreas vulneráveis requerem muitas vezes uma atenção especial por parte das autoridades responsáveis pela gestão do tráfego e das infraestruturas rodoviárias, pois podem acarretar transtornos aos usuários das rodovias, além de terem um potencial de causar danos materiais, feridos e até mesmo a morte.

Em suma, pontos críticos são situações atípicas que ocorrem na rodovia, onde as condições da via se deterioram a um ponto que ameaça a segurança dos usuários e a fluidez do tráfego (CNT, 2024). Eles podem manifestar-se de várias formas, sendo desde quedas de barreiras até buracos grandes, erosões de pista, problemas estruturais em pontes, bueiros, entre outros.

Minas Gerais, com sua extensa malha rodoviária de aproximadamente 25 mil quilômetros, sendo cerca de 20 mil quilômetros pavimentados (MINAS GERAIS, 2021), enfrenta constantes desafios em relação à manutenção e monitoramento dessas vias, especialmente durante o período chuvoso, quando o número e a intensidade dos pontos críticos aumentam consideravelmente.

Diante dessa realidade, o Departamento de Estradas de Minas Gerais (DER-MG) reconheceu a importância de uma gestão eficaz dos pontos críticos das rodovias sob sua responsabilidade, desenvolvendo uma solução projetada especialmente para mapear e monitorar esses locais. Essa solução é composta por um aplicativo de georreferenciamento, tecnologia que associa informações de localização geográfica a diversos outros dados, de acordo com suas necessidades, possibilitando a identificação precisa dos pontos críticos e a análise de sua distribuição espacial. Tal análise da distribuição espacial dos pontos críticos, não só ajuda a compreender os padrões de ocorrência como também permite que a autarquia tome melhores decisões, direcionando recursos e esforços de manutenção de forma mais eficaz.

Além disso, visando promover a transparência e a segurança, foi criado um painel público, com dados sobre os pontos críticos acessíveis à população em geral. Esse painel fornece informações em tempo real sobre as condições das rodovias, incluindo a localização e a gravidade dos pontos críticos, permitindo que os usuários, ao planejar suas viagens, tenham ciência especialmente dos locais de interdição e possíveis rotas alternativas. No mapa disponibilizado pelo painel, os usuários podem identificar facilmente além dos pontos com interrupção total, os locais com interrupção parcial de pista, bem como os trechos com desvios ou variantes e suas fotos. Além disso, são indicadas as datas em que cada incidente ocorreu e a previsão de conclusão das obras de reparo, fornecendo uma estimativa do tempo necessário para normalização da via. Esses detalhes permitem que os usuários tomem decisões que reduzam inconvenientes e riscos durante as viagens.

Ressalta-se que o DER-MG já realizava o monitoramento dos seus pontos críticos, porém, a implementação da nova ferramenta georreferenciada representa um avanço significativo para o órgão. As atividades envolvendo o geoprocessamento são executadas por Sistema de Informação Geográfica



DOI: [10.29327/1430212.49-93](https://doi.org/10.29327/1430212.49-93)

GESTÃO DE PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS:
UMA ABORDAGEM COM TECNOLOGIA DE MONITORAMENTO

(SIG), ou seja, sistemas que processam dados gráficos e não gráficos (alfanuméricos) com ênfase a análises espaciais e modelagens de superfícies (INPE, 2006). Segundo Burrough (1986), SIG é um conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real. O SIG facilita a atualização das informações e o diagnóstico do meio ambiente (CAVALIERI *et al.*, 1996), assim, a nova tecnologia do DER-MG proporciona uma compreensão mais abrangente e detalhada das condições das rodovias, contribuindo significativamente para uma gestão mais eficiente e proativa. Há uma expectativa de que a ferramenta permita melhorar a priorização de intervenções e alocação de recursos, além possibilitar ações preventivas para evitar acidentes e minimizar impactos negativos no trânsito.

Além disso, a tecnologia georreferenciada permite uma análise mais precisa da distribuição espacial dos pontos críticos ao longo do território que abrange as 40 Unidades Regionais (URGs) do DER-MG, possibilitando uma melhor compreensão dos padrões de ocorrência e a identificação de áreas de maior vulnerabilidade. Isso permite que decisões estratégicas mais inteligentes sejam tomadas para direcionar com maior confiança os trabalhos de manutenção e investimentos para as rodovias onde são mais necessários.

Neste artigo, será explorada a importância da identificação e gestão eficaz dos pontos críticos rodoviários, juntamente com as estratégias para mitigar os riscos associados a essas áreas, com o objetivo de promover a segurança e a fluidez do tráfego. Será detalhado especificamente o desenvolvimento da tecnologia implementada pelo DER-MG, descrevendo suas funcionalidades e os benefícios que ela tem proporcionado.

CONTEXTUALIZAÇÃO

O DER-MG foi criado em 1946, e em 1967 assumiu a responsabilidade pela gestão e manutenção da extensa malha rodoviária do estado, que antes era de responsabilidade dos municípios (MINAS GERAIS, 1967). O DER-MG tem sido um protagonista fundamental no desenvolvimento e na preservação das rodovias mineiras, desempenhando um papel crucial no fomento à mobilidade e ao desenvolvimento socioeconômico de Minas Gerais, e consequentemente do Brasil.

No que concerne ao controle de pontos críticos, tradicionalmente, eles eram identificados, monitorados e cadastrados pelas coordenadorias das URGs do DER-MG, através da inserção das informações em um sistema de gestão integrado utilizando um dispositivo *desktop* e *online*. Porém, esse sistema não dispunha de recursos de georreferenciamento, o que limitava a precisão e eficiência na localização e no acompanhamento dos pontos críticos ao longo das rodovias.

A ausência de georreferenciamento e a falta de um aplicativo de campo para registro instantâneo durante as vistorias representavam desafios significativos para o controle efetivo dessas áreas. As URGs precisavam lidar com processos manuais e morosos, o que muitas vezes resultava em atrasos na atualização dos dados e na adoção de medidas corretivas, bem como não existia um painel de informações que permitisse extrair dados de forma rápida e dinâmica. A falta dessa ferramenta dificultava a análise e o compartilhamento de informações entre as diferentes instâncias do DER-MG, não favorecendo o processo decisório e ações preventivas em tempo real.

Diante desse cenário, o DER-MG reconheceu a necessidade de modernizar suas práticas de controle de pontos críticos, incorporando tecnologias avançadas que possibilitassem uma abordagem mais eficaz e proativa na gestão dessas áreas vulneráveis ao longo das rodovias mineiras. Foi nesse contexto que surgiu em 2023, a ideia de desenvolver uma solução com aplicativo georreferenciado, uma ferramenta que revolucionou a forma como o DER-MG lida com o mapeamento e monitoramento dos pontos críticos rodoviários.



O DER-MG em 2023 iniciou um processo de modernização institucional, englobando sua estrutura organizacional, novos contratos de serviços, atualização de sistemas e implantação de novas soluções digitais. Essa iniciativa representa um importante passo rumo à digitalização e otimização das atividades da autarquia, contribuindo para o direcionamento mais assertivo do departamento com a segurança viária e a qualidade das rodovias em Minas Gerais. Ao adotar uma abordagem baseada em tecnologia de ponta, o DER-MG demonstra sua capacidade de adaptação e inovação para enfrentar os desafios contemporâneos no setor de transporte rodoviário.

METODOLOGIA EMPREGADA

Nesta seção, será apresentada em detalhes a metodologia utilizada pelo DER-MG no desenvolvimento da solução para mapeamento e monitoramento dos pontos críticos rodoviários. Serão discutidos os passos adotados desde a concepção da ideia até a implementação efetiva da ferramenta.

A tecnologia foi desenvolvida pelo DER-MG através de sua Assessoria de Gestão Estratégica (AEST), unidade administrativa, que tem como competência a promoção do gerenciamento estratégico setorial e fomento à implementação de iniciativas inovadoras, de forma alinhada à estratégia governamental (MINAS GERAIS, 2023). Foi contratada uma equipe de desenvolvimento de sistemas para apoiar a AEST em relação à arquitetura e desenvolvimento da solução.

Inicialmente, foi realizado um planejamento detalhado da estrutura do aplicativo, no qual foram definidos os objetivos principais, as funcionalidades necessárias e os requisitos técnicos. Esse processo envolveu um diálogo entre diversas áreas dentro do DER-MG e uma análise cuidadosa das necessidades e expectativas do órgão, em termos da gestão de pontos críticos.

Com base nos requisitos estabelecidos, a equipe de desenvolvimento projetou a interface do aplicativo, pensando em uma experiência intuitiva e acessível para os usuários. Além disso, foi elaborada a arquitetura do sistema, definindo a estrutura de dados, os algoritmos de georreferenciamento e os mecanismos de comunicação com o banco de dados.

Após a fase de planejamento, deu-se início à implementação do aplicativo, com a codificação das funcionalidades previamente definidas. Paralelamente, foram realizados diversos testes para garantir a estabilidade, segurança e eficácia do sistema. Nessa etapa, contou-se com a participação de colaboradores de diversas áreas dentro do DER-MG para realização de testes de usabilidade, integração e desempenho em diferentes dispositivos e ambientes.

Após os testes finais, foram realizados treinamentos e capacitações, para os servidores do DER-MG responsáveis pela operacionalização do sistema. Participaram entre outros, os coordenadores e membros das equipes técnicas alocados nas 40 URGs do órgão, responsáveis pela alimentação das informações e direcionamento das ações. Os treinamentos foram feitos em janeiro de 2024 de forma remota, e teve ampla participação, demonstrando uma boa adesão à novidade.

A partir daí, os cadastros efetivos começaram a ser realizados, tendo sido feitos desde então, pequenos ajustes de acordo com opiniões e melhorias que foram sendo propostas.

DESCRIÇÃO

A tecnologia utilizada no desenvolvimento do aplicativo para mapeamento e monitoramento dos pontos críticos rodoviários do DER-MG foi o ArcGIS Survey123. Esta solução representa um conjunto de funcionalidades com formulários, projetados para criar, compartilhar e analisar dados de forma eficiente e apresentar painéis (*Dashboard de BI*) com dados, gerar listas de prioridades, cálculos e indicadores para subsidiar tomadas de decisões. Além dos formulários e dos painéis, o



DOI: 10.29327/1430212.49-93

GESTÃO DE PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS: UMA ABORDAGEM COM TECNOLOGIA DE MONITORAMENTO

ArcGIS disponibiliza mapas interativos e associados aos dados de referência tabulares, dados dos sistemas e controles internos, e registros dos formulários, que são armazenados em sua organização na base de dados do ESRI.

Esses formulários (ArcGIS Survey123) podem ser utilizados para coletar dados tanto pela web quanto por dispositivos móveis, mesmo em ambientes *offline*, no caso do aplicativo instalado no dispositivo móvel. A capacidade de preenchimento *offline* é crucial para o DER-MG, uma vez que em muitos trechos das rodovias não há sinal de internet móvel. Isso garante que os servidores possam realizar vistorias e coletar dados mesmo em áreas remotas, sem comprometer a qualidade ou a integridade das informações, que serão atualizadas assim que o dispositivo obter sinal de internet.

No caso específico da solução do DER-MG, foram desenvolvidos quatro formulários: Cadastro de Pontos Críticos, Monitoramento Regional, Monitoramento Sede do DER-MG e Cadastro de Limite de Cargas (Figura 1). Cada um desses formulários desempenha um papel específico na identificação, acompanhamento e resolução das ocorrências nas rodovias, contribuindo para uma gestão mais eficiente e proativa dos pontos críticos.

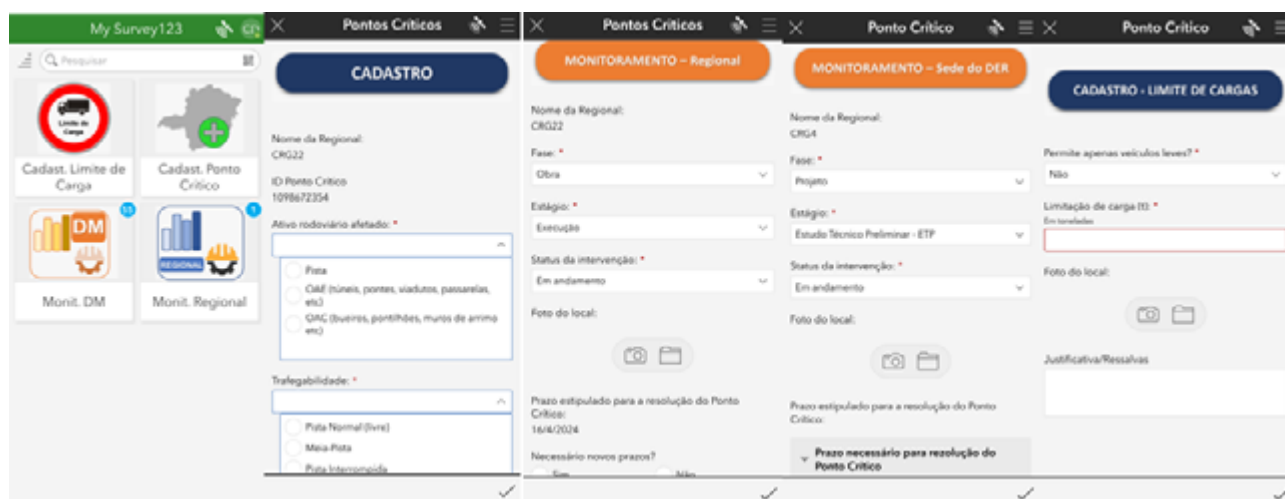


Figura 1: Interfaces do aplicativo ArcGis Survey 123 dos Pontos Críticos (DER-MG, 2024)

Os formulários captam uma variedade de informações, com opções de entrada de texto, imagem, localização e seleções inteligentes. Os resultados das coletas são imediatamente disponibilizados para análise, podendo ser representados graficamente ou exportados como relatórios formatados.

A seguir, será descrito cada um dos formulários desenvolvidos pelo DER-MG:

- **Cadastro de Pontos Críticos:** Este formulário é alimentado pelas Unidades Regionais (URGs) do DER-MG e tem como objetivo registrar informações detalhadas sobre os pontos críticos identificados nas rodovias. Ele inclui campo para localização georreferenciada, classificação e descrição do problema, gravidade da ocorrência, prazo para resolução e outras informações relevantes.
- **Monitoramento Regional:** Utilizado para acompanhar o progresso das intervenções nos pontos críticos cadastrados, este formulário fornece dados sobre a fase (projeto ou obra), estágio (estudo técnico preliminar – ETP, requisitos de contratação, licitação e execução) e status das ocorrências (a iniciar, em andamento, paralisado e concluído). Ele contribui na condução das URGs sobre a utilização do modelo de gestão institucional e favorece para a



alta gestão do DER-MG uma visão mais coesa e padronizada sobre o melhor direcionamento dos recursos de manutenção.

- Monitoramento Sede do DER: Este formulário é alimentado pela Diretoria de Manutenção do DER-MG e se concentra nos pontos que exigem apoio da Sede Administrativa para resolução. Ele registra informações sobre as ocorrências que necessitam de projetos e/ou contratações de empresas para realização de obras de reparo, tendo apoio sobretudo na preparação e condução de processos licitatórios e acompanhamento dos contratos necessários para resolução do problema. O prazo para conclusão desses pontos específicos é estimado pela Diretoria de Manutenção.
- Cadastro de Limite de Cargas: Alimentado pela Gerência de Obras de Arte Especiais (GOAE), este formulário é utilizado para registrar o limite de cargas nos casos em que ocorreram problemas estruturais em pontes e é necessário limitar o tráfego no local para garantir maior segurança aos usuários. Esse cadastro, inclui campo para descrever se a ponte tem condições de tráfego, e o limite de capacidade de carga atual, caso este seja permitido.

Os dados coletados, são apresentados em forma de painéis gerenciais, utilizados pelas equipes da URGs e pela Sede Administrativa do DER-MG, e também, por um painel público. Para facilitar a gestão regionalizada, foram criados painéis gerenciais específicos para cada regional do DER-MG.

Os painéis apresentam um mapa de Minas Gerais com os pontos críticos georreferenciados e sinalizados de acordo com o status de trafegabilidade da pista. As pistas são classificadas como "interrompida", "com variante", "meia pista" e "pista normal", sendo esta última excluída do painel público, pois consiste apenas em um mapeamento dos trechos que podem vir a se tornarem críticos e por isso, requerem uma atenção especial do DER-MG, agindo de forma preventiva.

Além do mapa, os painéis gerenciais exibem gráficos que mostram a distribuição dos pontos por região e por status das obras de reparação, indicando se encontram em fase a iniciar, em andamento, em projeto ou concluídas. Esses gráficos fornecem uma análise rápida e intuitiva da situação, agilizando o processo de repasse de informações e a elaboração de relatórios e outros documentos necessários para subsidiar a administração pública.

Além dos resumos dos grandes números, os painéis gerenciais também apresentam informações detalhadas de cada ponto crítico, incluindo o tipo de ocorrência, a URG responsável, a data de cadastro, a previsão de resolução, além de fotos da situação antes e após a resolução. Esses detalhes permitem uma análise mais aprofundada e uma resposta mais ágil às necessidades identificadas.

O painel público também conta com resumos dos grandes números e detalhes específicos por pontos cadastrados. Ele é de acesso livre no sítio institucional do DER-MG para qualquer pessoa interessada em obter informações sobre a situação das rodovias de Minas Gerais.

Tanto os painéis gerenciais quanto o painel público, possuem informações e gráficos com dados distribuídos ao longo do tempo, o que possibilitará extrair séries históricas. Essas séries históricas poderão ser usadas para identificar tendências, padrões sazonais e áreas de maior vulnerabilidade ao longo do tempo, fornecendo *insights* valiosos para o planejamento estratégico e a tomada de decisões futuras.

DISCUSSÃO

Desde janeiro até o início de abril de 2024, foram realizados 92 cadastros de pontos críticos com algum tipo de interrupção da trafegabilidade. Destes, 6 apresentaram interrupções totais, 10 apresentaram variantes e 76 tiveram interrupção de meia pista. É importante destacar que, desse total, 50 pontos críticos já foram concluídos, o que representa um resultado significativo em termos de



DOI: 10.29327/1430212.49-93

GESTÃO DE PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS: UMA ABORDAGEM COM TECNOLOGIA DE MONITORAMENTO

eficiência na resolução dos problemas identificados. Também foram cadastrados 211 pontos críticos classificados como pista-livre, o que demonstra a adoção do uso da ferramenta para o planejamento prévio aos períodos de chuva, prevenindo possíveis danos futuros e permitindo o direcionamento de ações preventivas para reduzir os impactos aos usuários.

A Figura 2, mostra um exemplo de como as informações são apresentadas dentro do painel gerencial do DER-MG.

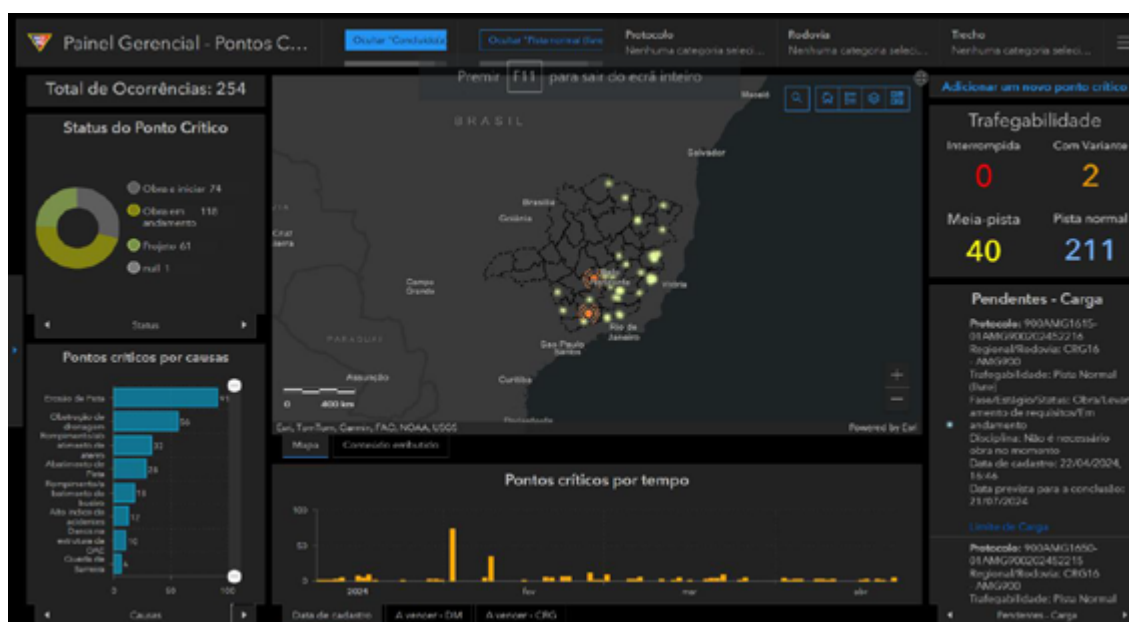


Figura 2: Painel Gerencial de Pontos Críticos do DER-MG (DER-MG, 2024)

Um caso relevante observado, foi cadastrado pela 10ª URG do DER-MG no dia 02 de abril de 2024, e ocorreu na rodovia CMG-267, no trecho que vai do acesso à Conceição do Rio Verde ao entroncamento com a BR-460, localizado no Sul/ Sudoeste de Minas. Na Figura 3, é possível visualizar no painel gerencial, o mapa com a localização e informações sobre o ponto. Classificado como dano em obra de arte corrente (OAC), o rompimento de um bueiro deixou a pista totalmente interrompida nos dois sentidos.

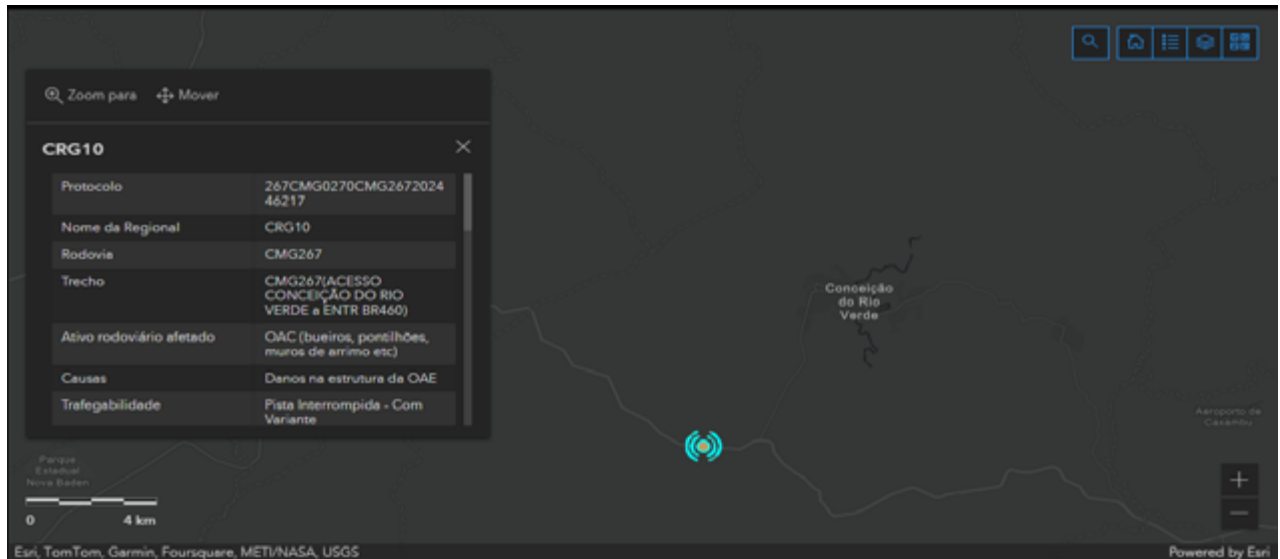


Figura 3: Painel com o mapa e informações de Ponto Crítico cadastrado (DER-MG, 2024)

Buscando minimizar os impactos na região, rapidamente foi criada uma variante no local (Figura 4 e Figura 5), alternativa que substituiu o trecho interrompido, evitando maiores transtornos aos usuários da via.



Figura 4: Variante feita na rodovia CMG-267 (DER-MG, 2024)



[DOI: 10.29327/1430212.49-93](https://doi.org/10.29327/1430212.49-93)

**GESTÃO DE PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS:
UMA ABORDAGEM COM TECNOLOGIA DE MONITORAMENTO**



Figura 5: Variante feita na rodovia CMG-267 (DER-MG, 2024)

Atualmente, a obra para resolução da ocorrência encontra-se em andamento (Figura 6) e tem previsão de ser concluída até junho de 2027.



Figura 6: Obra em andamento na CMG-267 (DER-MG, 2024)

A implementação do aplicativo e dos painéis gerenciais pelo DER-MG não apenas trouxe avanços significativos na gestão dos pontos críticos rodoviários, mas também teve um impacto positivo na cultura da organização. O engajamento dos servidores do DER-MG não se limitou apenas à adoção da nova tecnologia, mas também contribuiu para fortalecer a cultura organizacional.

É relevante ressaltar que a implantação do sistema ocorreu em uma época crítica, especialmente durante período chuvoso, o que representou um desafio adicional e o envolvimento ativo dos servidores no processo de implementação, demonstrando um alto nível de comprometimento com os objetivos da organização e uma disposição para abraçar mudanças e inovações. Esse engajamento não apenas facilitou a transição para o novo sistema, mas também ajudou a promover uma cultura de



colaboração e aprendizado contínuo dentro do departamento, contribuindo para a difusão dos conhecimentos em georreferenciamento.

Ao participarem do processo de implementação, os servidores tiveram a oportunidade de contribuir com *insights* e sugestões que ajudaram a moldar o desenvolvimento da tecnologia de acordo com as necessidades específicas da organização.

Além disso, a divulgação do painel público em jornais e outros meios de comunicação tem contribuído para aumentar a transparência e a participação pública no monitoramento dos pontos críticos. A conscientização da população sobre a situação das rodovias é essencial para promover uma cultura de segurança no trânsito e incentivar a colaboração de todos os envolvidos na busca por soluções e investimentos adequados para melhorar as condições da malha viária.

Uma melhoria adicional que está sendo implantada é a integração às plataformas de mobilidade, o que permitirá um maior compartilhamento entre o monitoramento dos pontos críticos e os sistemas de gestão do tráfego. Essa integração contribuirá para que os usuários sejam alertados diretamente nas aplicações de mobilidade e adotem rotas mais seguras e previsíveis.

CONCLUSÃO

O estudo de caso do DER-MG oferece uma visão detalhada das estratégias e tecnologias empregadas na identificação e gestão dos pontos críticos rodoviários. A implementação de uma solução georreferenciada representa um marco significativo na modernização, eficiência e transparência da gestão das rodovias do estado.

Ao longo deste artigo, foi discutida a importância dos pontos críticos rodoviários, destacando seus impactos na segurança viária e na fluidez do tráfego. Citou-se as deficiências dos métodos de mapeamento e monitoramento tradicionalmente utilizados pelo DER-MG e descreveu-se as etapas e metodologias empregadas por ele para superar esses desafios.

A introdução de tecnologias avançadas, baseadas no georreferenciamento de informações possibilitou uma resposta mais célere e direcionada às ocorrências nas rodovias. Os formulários simplificados e os painéis fornecem uma visão abrangente e detalhada da situação das rodovias, subsidiando a publicidade das ocorrências e a orientação para a política pública adequada.

Além dos benefícios operacionais, a implementação da solução gerou um impacto positivo na cultura organizacional do DER-MG. O engajamento ativo dos servidores demonstrou um compromisso sólido com os objetivos da organização e uma disposição para abraçar mudanças e inovações. Além disso, a divulgação dos painéis públicos contribuiu para aumentar a transparência e a participação pública no monitoramento das rodovias.

Embora o estudo de caso do DER-MG represente um avanço significativo na gestão de rodovias, houve e ainda há desafios a serem enfrentados. A análise de dados para identificar padrões e tendências ao longo do tempo é uma área que oferece oportunidades para futuras investigações e desenvolvimentos. Uma limitação a ser superada também é o acesso à plataforma pelas empresas contratadas para realizar as correções dos pontos críticos. Com a adição desses atores ao processo de monitoramento das obras, as informações geradas em campo estariam disponíveis mais rapidamente e os servidores conseguiriam gerenciar melhor as atividades dos contratos nas URGs. Outra limitação, que está sendo trabalhada uma solução, é a integração com as plataformas de mobilidade, Waze e Google Maps. A automação do compartilhamento das informações dos cadastros dos pontos nessas plataformas permite que os usuários utilizem rotas mais adequadas, seguras e em tempo real.

Por fim o caso do DER-MG destaca o potencial das tecnologias de georreferenciamento e gestão de dados para melhorar a segurança e a eficiência do transporte rodoviário. Ao continuar investindo em



[DOI: 10.29327/1430212.49-93](https://doi.org/10.29327/1430212.49-93)

GESTÃO DE PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS:
UMA ABORDAGEM COM TECNOLOGIA DE MONITORAMENTO

inovação e colaboração, o departamento está posicionado para continuar promovendo soluções eficazes, eficientes e econômicas para os desafios das rodovias em Minas Gerais.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURROUGH, P. A. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford: Clarendon Press, 1986.

CAVALIERI, A.; HAMADA, E.; ROCHA, J. V.; NETO, F. L. Aplicação de Sistema de Informações Geográficas em Estudos de Degradação do Solo. In: Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, 14-19 abril 1996. São José dos Campos: INPE, 1996. p. 91-92.

CNT, Confederação Nacional do Transporte. Radar CNT do Transporte – Pontos Críticos 2023. Brasília, 15 de janeiro de 2024. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/8f8896b9-3540-4a37-b6ad-c894a53a76ec>. Acesso em: 19, abr. 2024.

CUNHA, A. L. Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil: Avanços e Desafios. São Paulo: Editora Atlas, 2018.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Tutorial de Geoprocessamento. São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <https://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html>. Acesso em: 3 de maio de 2024.

MINAS GERAIS. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais. Boletim Rodoviário 2020. Belo Horizonte, 26 de agosto de 2024.

MINAS GERAIS. Executivo. Decreto nº 48.666, de 04 de agosto de 2023. Dispõe sobre a organização do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Diário do Executivo de Minas Gerais, Pag. 9 Col., Belo Horizonte, 05 de agosto de 2023.

MINAS GERAIS. Executivo. Lei Estadual nº 5.147, de 13 de janeiro de 1967. Dispõe sobre a criação do Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1967.

OLIVEIRA, F. G.; FILHO, F. B.; LIMA, R. S. Impacto dos Acidentes de Trânsito nos Custos Operacionais e Tempo de Deslocamento em Rodovias Brasileiras: Um Estudo de Caso. Journal of Transportation Engineering, v. 45, p. 210-225, 2023.

WOLSHON, B.; PANDE, A. Traffic Engineering Handbook (7th ed.). John Wiley & Sons, Inc., 2016.



Estudo de Caso: Utilização de Geotecnologias para catalogação e monitoramento da malha rodoviária da 26ª Unidade Regional do DER/MG

Érica Francisca de Paula Araújo¹; Samuel Passos²; Glaucus Dornas³; Wesley Fernando Cruz Santos⁴ & Mauro Alexandre Gomes

RESUMO

Tendo em vista a necessidade de otimizar os processos de uso, operação e manutenção de uma rodovia, aliada ao conhecimento e constante monitoramento da situação da malha rodoviária, além da manutenção de bancos de dados atualizados das intervenções realizadas, a busca por novas tecnologias que facilitem o levantamento e conferência rápida de informações é uma necessidade constante.

As geotecnologias são um conjunto de tecnologias voltadas para coleta, processamento, análise e disponibilização da informação com referência geográfica. Atualmente o estado de Minas Gerais tem a maior malha rodoviária do Brasil. Conforme consta no boletim rodoviário do Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais – DER/MG, em 2019 o estado possui uma malha de 25690,91 km de rodovias sob responsabilidade do DER/MG.

Diante da grande extensão da malha viária do Estado é de extrema importância que todas as informações sobre a mesma estejam em um banco de dados de fácil acesso e constantemente atualizado. Portanto esse trabalho visa contribuir com estudos sobre a utilização de geotecnologias para catalogação e monitoramento da malha rodoviária.

O estudo foi realizado através da utilização do QGIS e do Google Earth para catalogação de toda malha da 26ª URG, sendo ela pavimentada ou não pavimentada, com a inclusão de dispositivos de drenagem (sarjetas, bueiros, etc), sinalização vertical (placas de projeto instaladas e substituídas), sinalização horizontal (tipo de faixa e data da realização da revitalização), dentre várias outras questões pertinentes a malha, possibilitando assim fácil controle das demandas e intervenções na mesma. Após a realização do trabalho foi notável a facilitação do controle dos dispositivos da malha, facilitando e trazendo agilidade para a criação de orçamentos e levantamento de informações para demandas diversas.

PALAVRAS-CHAVE: Geotecnologias; Sistema de Informações Geográficas; Malha Rodoviária; Minas Gerais.

ABSTRACT

Given the need to optimize the processes of use, operation, and maintenance of a highway, coupled with the knowledge and constant monitoring of the situation of the road network, in addition to maintaining updated databases of interventions carried out, the search for new technologies that facilitate the collection and rapid verification of information is a constant need.

Geotechnologies are a set of technologies aimed at collecting, processing, analyzing, and making information available with geographical reference. Currently, the state of Minas Gerais has the largest road network in Brazil. According to the road bulletin of the Department of Highways and Roads of Minas Gerais - DER/MG, in 2019 the state had a network of 25,690.91 km of highways under the responsibility of DER/MG.

Given the great extension of the state's road network, it is extremely important that all information about it is in an easily accessible and constantly updated database. This work aims to contribute to studies on the use of geotechnologies for cataloging and monitoring the road network.

The study was carried out using QGIS and Google Earth to catalog the entire network of the 26th URG, whether paved or unpaved, including drainage devices (curbs, culverts, etc.), vertical signage (project plates installed and replaced), horizontal signage (type of lane and date of revitalization), among several other issues relevant to the network, thus enabling easy control of demands and interventions in it.

KEY WORDS: Geotechnologies; Geographic Information System (GIS); Road Network; Minas Gerais (Brazilian state)



¹ Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais – DER/MG, erica.araujo@der.mg.gov.br ;
samuel.passos@der.mg.gov.br ; glaucus.dornas@der.mg.gov.br; weslev.santos@der.mg.gov.br;
mauro.gomes@der.mg.gov.br

INTRODUÇÃO

Minas Gerais é o Estado com maior malha viária do Brasil, possuindo um total de 25.690,91 km de rodovias sob responsabilidade do Estado, excluindo as rodovias federais, municipais e concessionadas, conforme Boletim Rodoviário de 2019 do Departamento de Estradas e Rodagem – DER/MG.

Devido à grande extensão da malha viária, e à sua grande importância no transporte de cargas e pessoas no Estado de Minas Gerais, o estado de conservação das mesmas torna-se um ponto chave nos impactos econômicos causados tanto a população, devido à grande incidência de acidentes, quanto ao aumento da necessidade de manutenção dos veículos, o que acaba acarretando impacto aos cofres do Estado devido a necessidade de obras de remediação, que se tornam mais caras que obras de prevenção, além dos custos referente a recuperação de pessoas que passaram por acidentes rodoviários.

Para garantir o bom estado de conservação das rodovias mineiras é de extrema importância o pleno conhecimento de toda malha, além de todos os dispositivos presentes e a situação em que cada item se encontra.

O Estado não possui um banco de dados único disponível para o controle da malha rodoviária em cada regional, sendo necessário a realização de levantamentos e construção de base de dados próprias em cada unidade regional do Estado referente a sua área de abrangência.

Muitas vezes a construção e atualização desse banco de dados é algo executado com baixa frequência, devido a vasta extensão da malha e baixo número de servidores disponíveis.

As geotecnologias são tecnologias voltadas para coleta, processamento, análise e disponibilização de informações georreferenciadas, várias tecnologias fazem parte desse grupo.

Os SIG ou GIS, do inglês *Geographic Information Systems*, são sistemas que possibilitam a conexão de informações geográficas a banco de dados com outras informações. Os SIG permitem realizar análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e criar bancos de dados georreferenciados.

A utilização de geotecnologias vem sendo estudada, descrita e utilizada em outras áreas, principalmente na área ambiental onde já é uma ferramenta estabelecida para facilitar o trabalho dos servidores no intuito de conferência do estágio de desenvolvimento da vegetação de determinada área, ou a análise de estudos de impacto ambiental de grandes empreendimentos.

O sensoriamento remoto é uma ciência utilizada para a detecção de objetos sem contato direto com eles. As propriedades físicas da interação da energia eletromagnética possibilitam caracterizar tais objetos. Essa pluralidade temática para a qual o uso das geotecnologias tem convergido advém de diferentes matrizes teórico-metodológicas, mormente as abordagens integrativas que procuram analisar a relação Sociedade-Natureza (SILVA; ROCHA; AQUINO, 2017).

O trabalho consiste na utilização do GIS para a catalogação de cada item da malha, essa parte demanda uma maior parte de tempo, visto que pra garantia da correta localização e extensão dos dispositivos os mesmos são coletados “in loco”.

Após a realização da coleta todas as informações são descarregadas de forma georreferenciada e são feitas as catalogações das mesmas em forma de mapas, visando facilitar a sua identificação posteriormente.



[DOI: 10.29327/1430212.49-92](https://doi.org/10.29327/1430212.49-92)

Estudo de Caso:

Utilização de Geotecnologias para catalogação e monitoramento da malha rodoviária da 26ª Unidade Regional do DER/MG

Esse trabalho visa auxiliar na construção de um banco de dados, constando todas as informações pertinentes a malha, que seja fácil a consulta e visualização, além de facilitar o monitoramento do mesmo, garantindo assim informações seguras e com rapidez quando necessário para atendimento de qualquer demanda.

REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Souza et al. (2014) a tomada de decisões no ramo rodoviário são geralmente complexas e não devem ser entendidas como disciplinas independentes, uma vez que segundo os autores decisões físicas resultantes de um projeto viário invariavelmente irá gerar reflexos de contexto geográfico, desta forma o manual de conservação rodoviária do Departamento Nacional de Infraestrutura o Inventário de Elementos Geradores de Serviços de Conservação para que se possa planejar os serviços de Conservação Corretiva Rotineira é preciso saber e conhecer quais e quantos elementos são geradores de serviços. Sendo assim, conforme o manual, para que se possa planejar e administrar os serviços de conservação de uma rodovia é necessário saber em primeiro momento, quais são os elementos geradores dessas demandas em manutenção. Para o ato de quantificar esses elementos através de um registro que se dá o nome de Inventário de Elementos Geradores de Serviços de Conservação. Ainda segundo o DNIT a elaboração deste inventário é um elemento gerador de um volume imenso de dados, que precisam ser organizados e ordenados de forma de modo que possam ser utilizados de maneira mais eficiente possível. Desta forma ainda segundo Souza et al. a complexidade destas variáveis no processo de planejamento de transportes, requer o emprego de modelos computacionais para apoiar a tomada de decisão.

Como um sistema de informações espaciais, o GIS é uma plataforma apropriada para a integração da geometria e a topologia de objetos espaciais com a atributos e dados com propriedades métricas e não-métricas destes mesmos objetos espaciais, de forma que ainda segundo os autores o GIS pode representar de forma realista a geometria de sistemas viários, como forma, distância ou elementos pontuais.

O Sistema de Informações Geográficas para Transportes ou GIS-T, conforme exposto no trabalho técnico, *Designing Geodatabases for Transportations*, publicado pela empresa ESRI, quotidianamente lida dentro da indústria com aplicações específicas de modo e função, cada uma com seu próprio design de base de dados geográfico. Sendo que esta base de dados geográfica deve acomodar os vários esquemas de segmentação adotados e os vários sistemas de referências lineares e de coordenadas disponíveis para mostrar a localização dos elementos, meios de transportes, e características dos meios de transportes estudados. Ainda segundo o texto publicado pela ESRI todas as bases de dados geográficas estabelecem uma série de representações abstratas do mundo real, esse processo de abstração é chamado modeling, ou modelagem, um exemplo seria a possibilidade de se representar sistemas de transporte lineares através de linhas, apesar de ser uma simplificação uma vez que no mundo real esses meios de transporte são de fato áreas, a representação destes em polígonos acarretaria em uma perda de diversos recursos de análise. O texto citado defende que esta abstração não é na realidade um problema, uma vez que um dos aspectos centrais destas formas de transporte são de fato a sua linearidade isto faz com que pontos e linhas sejam as principais formas de representação do mundo abstratos dos meios de transporte. Mesmo não havendo uma construção formal de uma modelo de dados, existe um dentro de cada base de dados geográfico. O que faz com que também exista algo externamente, como uma lista de



atributos, classes, propriedades destas classes ou qualquer outra descrição de conteúdo para a base de dados e a sua estrutura.

METODOLOGIA

Para elaboração da catalogação da malha viária da 26ª URG (Unidade Regional do DER/MG), foi realizado em primeiro momento a separação das vias alvo do estudo em duas categorias, sendo elas: Rodovias Pavimentadas e Rodovias Não Pavimentadas. Esta separação é realizada devido ao entendimento de que ambas as rodovias apresentam características distintas, e por isto apresentarão elementos de demandas para catalogação igualmente distintas. Como algumas rodovia, como é o caso da LMG706 apresentam simultaneamente trecho Pavimentados e Não Pavimentados, foi realizada uma divisão das rodovias em segmentos, para tal, foi adotada a segmentação já proposta pelo DER e presente em publicações como o Boletim Rodoviário ou outros documentos de autoria do órgão, desta forma foram traçados pela aplicação Google Earth cada trecho individualmente através do comando “Caminhos”, em cada trecho foi identificado o sua Categoria, Km inicial, Km final e a extensão total da faixa de domínio.



Figura 1 - Delimitação dos trechos da malha da 26ª Unidade Regional do DER/MG

Com os segmentos e rodovias identificadas, foi elencado os grupos de Elementos Geradores de Demandas que serão levantados, sendo que para as rodovias pavimentadas foram definidos: Sinalização Vertical, Sinalização Horizontal, Drenagem; Pavimentação, Obras de Arte Especiais e



DOI: [10.29327/1430212.49-92](https://doi.org/10.29327/1430212.49-92)

Estudo de Caso:

Utilização de Geotecnologias para catalogação e monitoramento da malha rodoviária da 26ª Unidade Regional do DER/MG

Faixa de Domínio. Enquanto para as Não Pavimentadas foram definidas: Segurança Viária; Drenagem; Faixa de Rolamento; Obra de Arte Especiais e Faixa de Domínio. Os elementos que serão levantados devem ser organizados dentro de cada um destes grupos em subgrupos de forma a dar ordem a catalogação da rodovia.

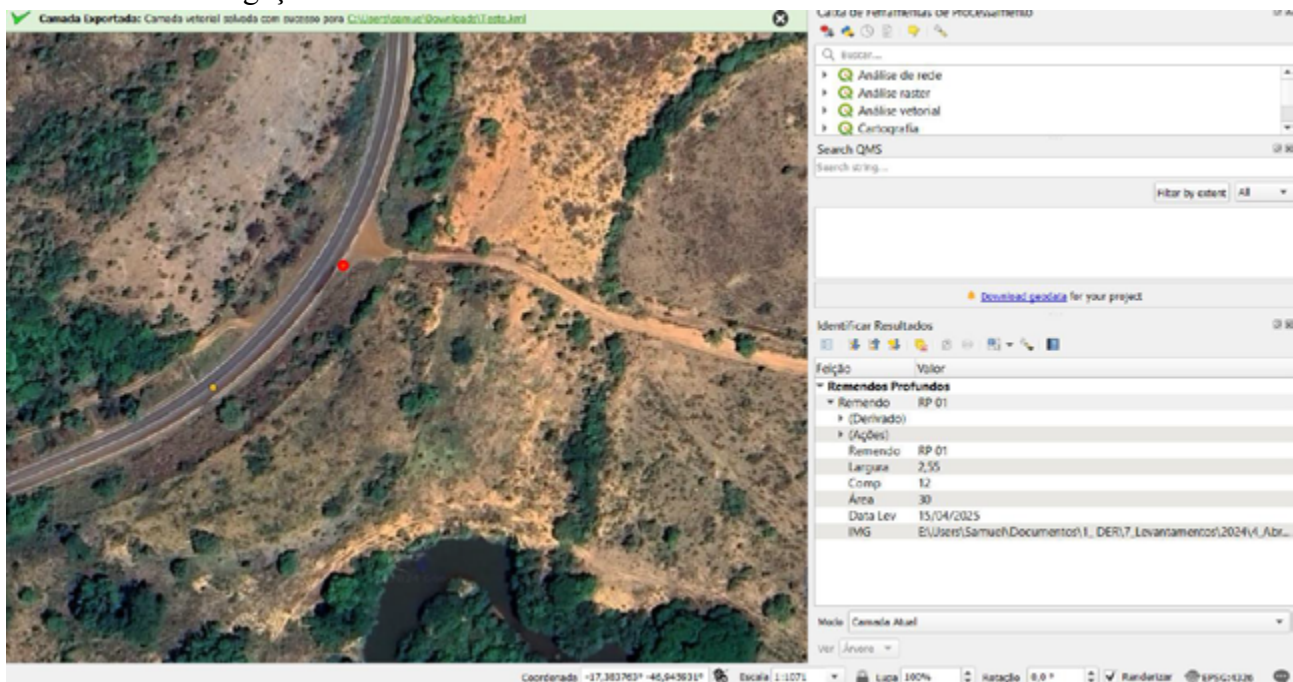


Figura 2 - Inclusão dos pontos de remendos profundos levantados

Com a preparação devidamente realizada os levantamentos dos itens das rodovias podem ser inclusos no catálogo. A execução do levantamento de cada item vai depender da natureza do mesmo, bem como a maneira que o elemento vai ser identificado dentro de um sistema de georreferenciamento, contudo de maneira geral para a catalogação dos elementos estudados. Foram realizadas incursões ao trecho Cabeceira Grande – Unaí, da MG-188, onde através do aplicativo *TimeStamp*, foram registradas fotografias com marcadores de latitude e longitude de todos os elementos levantados presentes no trecho, desta forma, ao mesmo tempo coletando as coordenadas do item e fazendo um registro visual das condições atuais do componente da rodovia, seja ele uma placa, sarjeta ou qualquer objeto estudado. Com o levantamento executado, foi realizado o lançamento dos dados nos programas de georreferenciamento, para isso foi utilizado em primeiro momento a aplicação QGIS, nele as coordenadas foram incluídas em um *shapefile*, para elementos pontuais como placas, bocas de lobo ou saídas d'água são incluídos apenas os pontos, para elementos lineares como sarjetas, linhas de sinalização horizontal ou valetas de proteção são incluídos das linhas com o traçado dos elementos. Após a inclusão dos elementos é realizado o preenchimento dos dados pertinentes para cada elemento levantado. São acrescentadas informações como dimensões, data de implantação ou qualquer dado importante para o manejo e conservação do ativo rodoviário. Em seguida o dado é salvo em KML e exportado para a aplicação *Google Earth* para melhor visualização e organização dos dados.



Érica Francisca de Paula Araújo, Samuel Passos, Glaucus Dornas,
Wesley Fernando Cruz Santos & Mauro Alexandre Gomes

Remendo	RP 01
Largura	2,55
Comp	12
Área	30
Data Lev	15/04/2025
E:\Users\Samuel\Documentos\1_DER\7_Levantamentos\2024\4_Abr\MG188 - Levantamento de Remendos Profundos\1-Fotos\01.jpeg	

IMG

Figura 3 - Preenchimento da ficha com as informações pertinentes do objeto alvo do levantamento.

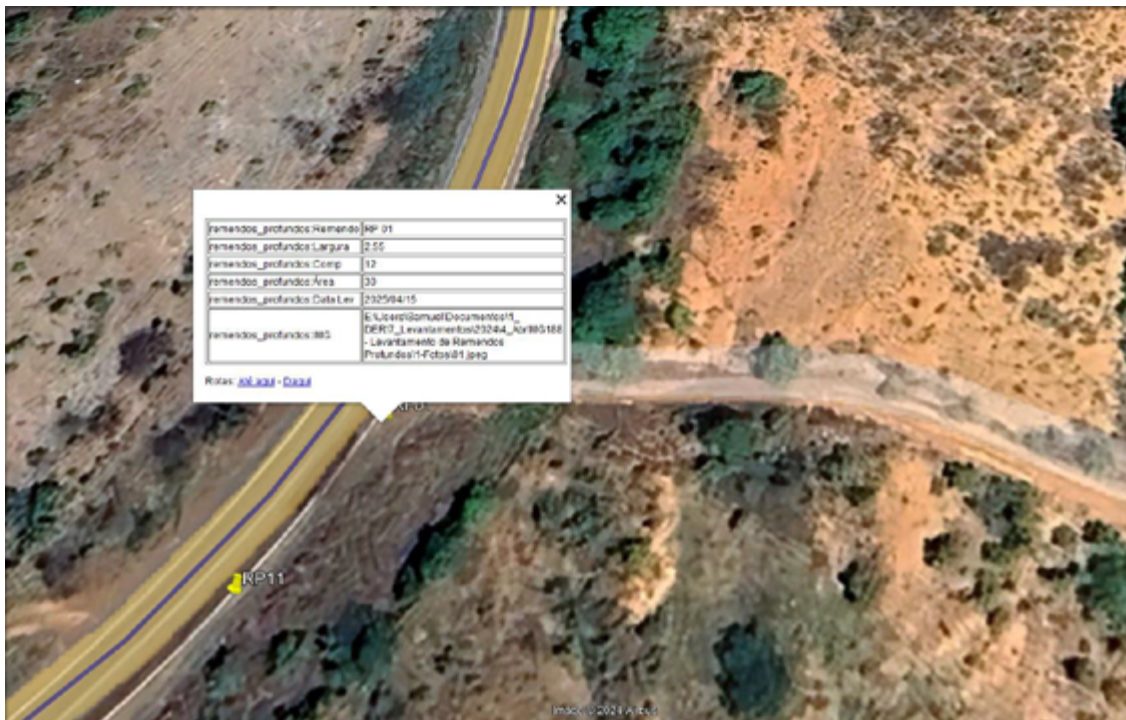


Figura 4 - Levantamento transportado para a aplicação Google Earth



DOI: [10.29327/1430212.49-92](https://doi.org/10.29327/1430212.49-92)

Estudo de Caso:

Utilização de Geotecnologias para catalogação e monitoramento da malha rodoviária da 26ª Unidade Regional do DER/MG

RESULTADOS

Foi realizado seguindo o esquema proposto na seção anterior a modelagem da malha viária da 26ª URG para a execução de uma catalogação da via, foram levantados conforme observa o manual de conservação rodoviária emitido pelo DNIT os Elementos Geradores de Serviço e desta forma foi possível observar diversas demandas para realização de trabalhos de manutenção viária, com a utilização de geotecnologias é possível observar a relação espacial dos diferentes serviços demandados, trazendo desta forma uma nova perspectiva sobre a tomada de decisão para a atuação na resolução dos problemas demandados no cotidiano da conservação de uma malha rodoviária. O levantamento também permitiu elencar locais como fornecedores de insumos, jazidas de extração de material, o que proporciona uma melhor visualização de como será organizado os trabalhos, tendo em vista os transportes de material.



Figura 5 - Resultado do Levantamento de Sinalização Vertical. Fonte: Os Autores.

Os levantamentos de Elementos Geradores de Serviços foram realizados em etapas, levando em consideração a separação realizada por grupos, desta forma foram executadas diversas visitas ao trecho da MG-188 localizado entre Cabeceira Grande - Unaí, cada uma com o objetivo de observar os itens pertinentes de cada grupo criado, para o grupo de sinalização vertical foi possível obter todas as placas que necessitavam de substituição na malha, todas elas foram devidamente fotografadas, ao final foi possível obter um arquivo com as coordenadas e localização de todas as



placas, além de conseguir elencar as placas faltantes, com isso obteve-se um documento com referência de data e localização, ou seja um registro histórico do atual estado da sinalização vertical da via, após a troca e com a instalação das novas placas o levantamento será atualizado e com isso alguns dados poderão ser obtidos e entendidos com mais profundidade. Como por exemplo a utilização do modelo obtido da condição atual em confronto com dados de acidentes da região para melhora e aperfeiçoamento da segurança viária, todavia, em primeiro instante vale destacar a contribuição que a prática fornece na qualidade e opções para tomada de decisão no que se refere a manutenção da via, logo no primeiro instante foi possível obter o quantitativo total para a renovação da sinalização vertical, foram um total de 250,60 m² de placas levantadas e que serão substituídas ou implantadas na via.



Figura 6 - Exemplo de imagem capturada para o Levantamento de Sinalização Vertical. Fonte: Os Autores.

Já no grupo de pavimentação foi realizado um levantamento das condições de rolamento da rodovia, observando as patologias encontradas nos locais, com isso para a categoria de sinalização vertical foi possível observar como as patologias levantadas se espalham geograficamente, e em especial nesta categoria é possível observar os pontos com maiores defeitos. Desta forma é possível



DOI: [10.29327/1430212.49-92](https://doi.org/10.29327/1430212.49-92)

Estudo de Caso:

Utilização de Geotecnologias para catalogação e monitoramento da malha rodoviária da 26ª Unidade Regional do DER/MG

observar e ter uma ideia mais ampla de como as patologias estão dispostas ao longo da rodovia, sendo possível categorizar os pontos com maior acumulo de patologias, o que por sua vez permite segmenta-los de modo a construir subtrechos com estados de qualidade de pavimento em comum e obter uma avaliação mais precisa da qualidade da faixa de rolamento, além de produzir segmentos e possibilitar uma visualização ampla das condições da rodovia em caráter de rede.

A junção de todos os pontos descritos possibilita uma tomada de decisões mais assertiva no que tange a localidade que será alvo de medidas de recuperação. É possível observar também a vantagem de se sobrepor levantamentos de diferentes categorias, como por exemplo o que pode ser visto na figura 8, onde se sobrepõe o levantamento de drenagem com o de remendo profundo, é possível observar como exemplo pontos onde problemas de drenagem podem ter ocasionado patologias no pavimento, desta forma é possível organizar não somente serviços de manutenção para correções pontuais das patologias em si, mas também organizar em conjunto com eventuais defeitos adjacentes a pista de rolamento que podem estas contribuindo para a formação da patologia, o que otimiza a manutenção, favorecendo o não retorno do defeito no pavimento.



Figura 7 - Levantamento de segmentos similares, em vermelho: mau, laranja: Regular, Azul: Bom. Fonte: Os autores



Érica Francisca de Paula Araújo, Samuel Passos, Glaucus Dornas, Wesley Fernando Cruz Santos & Mauro Alexandre Gomes



Figura 8 - Comparação dos levantamentos de Drenagem e Patologias no pavimento. Fonte: Os Autores

Outra possibilidade que o monitoramento e a catalogação da via possibilitam é o controle da execução de serviços e do retorno da patologia, ou seja, através da catalogação é possível ter o histórico das intervenções na via a partir do momento em que o controle de serviços começou a ser executado, o que pode ser muito importante para a visualização da possibilidade da necessidade da aplicação de métodos diferentes para a resolução de uma patologia recorrente.

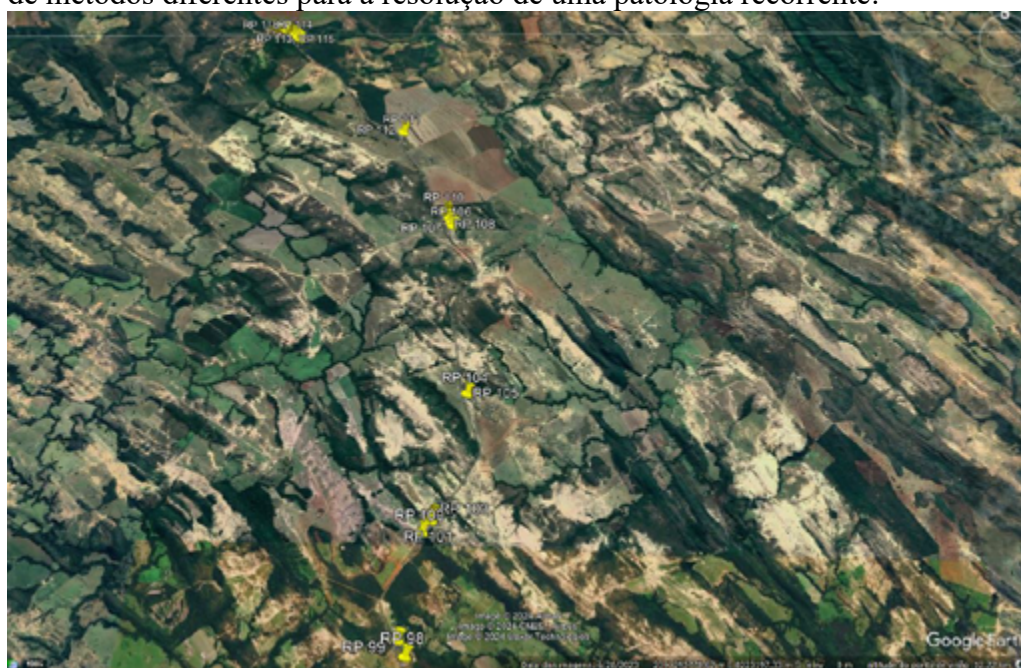


Figura 9 - Levantamento de pontos de remendo profundo, criação de histórico de intervenções na rodovia. Fonte: Os Autores



DOI: [10.29327/1430212.49-92](https://doi.org/10.29327/1430212.49-92)

Estudo de Caso:

Utilização de Geotecnologias para catalogação e monitoramento da malha rodoviária da 26ª Unidade Regional do DER/MG

CONCLUSÃO

Durante o processo de elaboração e execução do estudo de caso, foi possível observar a quantidade elevada de elementos e a complexidade dos mesmos, uma vez que se trata de diversos grupos de atividade, tais como segurança viária, drenagem, pavimentação, faixa de domínio, dentre outras, que devem ser catalogados com a finalidade de facilitar o acompanhamento e evolução dos trabalhos de manutenção não somente nas vistorias realizadas periodicamente, mas também na geração de banco de dados e histórico de manutenção.

Além de gerar dados concretos e confiáveis para servir de base na elaboração de novos contratos e ou programas de manutenção que venham a ser pensados pela alta direção do DER-MG afim da melhoria no nível de serviço prestado. Devido à dificuldade geográfica e logística da malha viária, além da realidade da maioria das regionais do DER-MG que apresenta reduzido número de profissionais para os trabalhos constantes de vistorias, a utilização da ferramenta de georreferenciamento aliado ao cadastro inclusive fotográfico, facilita o trabalho dos gestores auxiliando na tomada de decisão, possibilitando a priorização das demandas, visando a melhoria das condições das vias para os usuários.

Sendo assim a utilização da metodologia poderá ser disseminada nas demais unidades regionais com o intuito de enriquecer o banco de dados da maior malha viária do País. Também é possível observar que o trabalho de catalogação dos itens geradores de demandas é de extrema importância para o entendimento do funcionamento da via mantida, seus pontos sensíveis, os locais com maior presença de patologia, os locais com falha de sinalização viária, ou qualquer outra característica que exija do órgão mantenedor uma ação específica de recuperação ou restauração, ou que exija de alguma forma a realização de um algum serviço para sua solução. Desta forma foi possível observar a tecnologia GIS como um grande aliado e uma ferramenta extremamente poderosa para a criação e integração desse modelo de catalogação com o dia a dia da manutenção rodoviária, sendo possível através dela alcançar um melhor entendimento dos elementos geradores de demanda e como essas demandas estão distribuídas ao longo da rede mantida. Portanto observa-se que o GIS para além de uma interface onde os itens são meramente catalogados, a tecnologia se prova como uma ferramenta facilitadora da tomada de decisão, onde diversos catálogos podem ser confrontados e pode-se extrair outros resultados e produtos a partir dos dados colhidos.

REFERÊNCIAS

BUTTLER, A. J. **Designing Geodatabases for Transportation**. 1. ed. New York: ESRI Press, 2008.

DELOUKAS, A. et al. GIS-Based Transportation Planning and Analysis: A Practical Implementation. **IFAC Transportation Systems**, 1997. 417-426.



DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **Manual de Conservação Rodoviária**. Rio de Janeiro: Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias., 2005.

JONES, C. B. **Geographical Information Systems and Computer Cartography**. 2ª. ed. New York : Routledge. Taylor & Francis, 2013.

LEITE, M. E. et al. Geotecnologias aplicadas a estimativa da temperatura de superfície em diferentes usos e ocupações do solo na Área de Proteção Ambiental do Rio Pandeiros – Minas Gerais. **Caderno de Geografia**, 2018. 490-509.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento Tecnologia Transdisciplinar**. Juiz de Fora: Ed. do Autor, 2000.

SAATY, T. L.. Transport planning with multiple criteria: the analytic hierarchy process applications and review progress. **Journal of Advanced Transportation**, 1995. 81-126.

SANTOS, P. A. P. D. INVENTÁRIO RODOVIÁRIO E FERROVIÁRIO DA SADC. **Academia.edu**, 2023. Disponível em:
<https://www.academia.edu/101680133/INVENT%C3%81RIO_RODOVI%C3%81RIO_E_FERROVI%C3%81RIO_DA_SADC>. Acesso em: 12 Fevereiro 2024.

SOUZA et al. GEOTECNOLOGIAS APLICADAS ÀS AUDITORIAS DE OBRAS PÚBLICAS NO BRASIL: PANORAMA GERAL E PERSPECTIVAS. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, 2017. 1387-1401.

SOUZA, C. N. P. D.; ARAUJO, F. R. N. D.; NÓBREGA, R. A. D. A. MODELAGEM DE DADOS GEOGRÁFICOS PARA OTIMIZAÇÃO DO ESTUDO DE UM CORREDOR FERROVIÁRIO ENTRE PARACATU-MG E IPATINGA-MG. **ANPET**, 2014.



Análise de modelos de previsão de consumo de combustível em veículos a partir da irregularidade longitudinal do pavimento

Eduarda Lemos Rodrigues¹; Leônidas Augusto da Silva¹; Andriele Ambros de Oliveira¹; Renan Gustavo Scherer¹; Deividi da Silva Pereira¹; Luciano Pivoto Specht¹ & Lucas Dotto Bueno¹

RESUMO

De acordo com a Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2023), o Brasil apresenta a maior parte das suas rodovias com defeitos no pavimento. Isto se reflete numa má qualidade funcional que implica, a partir de determinada magnitude, na necessidade de intervenções no pavimento. Esta qualidade funcional pode ser determinada pela irregularidade longitudinal do pavimento, que além de avaliar a qualidade do rolamento, também permite verificar seu impacto no conforto dos usuários e nos custos operacionais dos veículos, como o aumento do consumo de combustível. Em vista disto, a presente pesquisa foi realizada com o objetivo de identificar e comparar modelos que estimam ao longo dos anos o consumo de combustível utilizando como um dos parâmetros a irregularidade longitudinal do pavimento, e verificar aquele mais adequado para esta previsão. Para a realização da pesquisa foi realizada uma revisão bibliográfica de literatura técnico-científica, a fim de organizar um conjunto de modelos que estimam o consumo de combustível considerando a irregularidade longitudinal do pavimento. Após, os modelos encontrados foram simulados com diferentes valores de IRI a fim de compará-los entre si. Com base nas simulações realizadas foi possível perceber que evolução do consumo de combustível previsto nas diferentes condições de IRI avaliadas diferem entre os modelos. Dentre os avaliados, o modelo do software HDM-4 foi o que manteve maior consistência entre as diferentes simulações realizadas.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentos, Irregularidade Longitudinal, Consumo de Combustível, Revisão Bibliográfica, HDM-4.

ABSTRACT

According to the National Transportation Confederation (CNT, 2023), most of Brazil's roads have pavement defects. This is reflected in poor functional quality that implies, from a certain magnitude, the need for pavement interventions. This quality can be measured by the pavement roughness, which also assess ride quality, also makes it possible to check its impact on user comfort and vehicle operating costs, such as increased fuel consumption. In light of this, the present research aims to identify and compare models that estimate fuel consumption over the years using pavement roughness as one of the parameters, and to determine the most suitable model for this prediction. A literature review of technical-scientific literature was conducted to organize a set of models that estimate fuel consumption considering pavement roughness. Subsequently, the identified models were simulated with different International Roughness Index (IRI) values for comparison. Based on the simulations, it was observed that the predicted fuel consumption evolution under different IRI conditions varied among the models. Among those evaluated, the model from the HDM-4 software maintained the highest consistency across the different simulations.

KEY WORDS: Pavement, Roughness, Fuel Consumption, Bibliography Review, HDM-4.

¹ Universidade Federal de Santa Maria, duda.lr@hotmail.com; silva.leonidas@acad.ufsm.br; andriele.ambros@acad.ufsm.br; renangscherer@gmail.com; dsp@ufsm.br; luspecht@ufsm.br; lucas.bueno@ufsm.br.



INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário é fundamental para o escoamento da produção e o deslocamento de pessoas no Brasil. Entretanto, mesmo sendo essencial para o funcionamento da economia do país, segundo relatório divulgado pela Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2023), 56,8% das rodovias apresentam defeitos no pavimento. A condição funcional presente na malha rodoviária é afetada por fatores como a qualidade construtiva, a seleção e dosagem dos materiais, a ação do tráfego e condições climáticas, resultando em desvios verticais da superfície do pavimento em relação à uma superfície plana. Tais desvios podem ser mensurados pelo Índice Internacional de Irregularidade (IRI, do inglês *International Roughness Index*), amplamente empregado em escala mundial para este tipo de avaliação (LEMLIN, 1998). Uma vez que a condição funcional da via afeta a trafegabilidade e conforto, faz-se necessário que haja intervenções ao longo da vida útil do pavimento, possibilitando assim um melhor fluxo de bens e usuários.

Bernucci *et al.* (2022) indicam que ao se transitar em vias deterioradas ocorrem prejuízos ao conforto dos usuários e um acréscimo nos custos operacionais, destacando-se o aumento do consumo de combustível. Desse modo, os autores complementam que um trecho que dispõe de boa qualidade melhora as condições dos passageiros, possibilita fluidez no tráfego e reduz os custos de transporte, qualidade esta que pode ser mensurada pelo IRI. Ademais, de acordo com Hellmann (2018), a condição de tráfego do veículo, sua potência de motor, aerodinâmica e calibração de pneus também são parte dos fatores que interferem no consumo de combustível.

Tanto a irregularidade longitudinal como o consumo de combustível podem ser estimados por meio de modelos. Diante disto, faz-se necessário a identificação e a análise destes modelos para assim comparar suas previsões. Desta forma, foi realizado o presente estudo, com o objetivo de identificar o conjunto de modelos que estimam o consumo de combustível ao longo do tempo, utilizando como um dos parâmetros a irregularidade longitudinal do pavimento, e analisar qual apresenta previsões mais adequadas para as condições nacionais atuais.

IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

Segundo DNIT (2023), a forma empregada para avaliar a irregularidade longitudinal dos pavimentos é o Índice Internacional de Irregularidade (IRI), entendido como uma escala de medição que toma como base a resposta do modelo matemático que representa um semieixo de um automóvel ao perfil longitudinal da superfície da rodovia avaliada (SAYERS, 1995). Sua implementação, nos últimos anos, substituiu o uso do parâmetro Quociente de Irregularidade (QI) que era o responsável por avaliar a qualidade do rolamento e seu impacto na utilização dos usuários (DNER, 1994). Caso haja necessidade de conversão entre os dois parâmetros, pode-se seguir a indicação do Manual de Restauração (DNIT, 2006), que reproduz a conversão recomendada por Sayers; Gillespie e Queiroz (1986) e Paterson (1987), o modelo usual que correlaciona o QI com o IRI e é apresentado na Equação 1.

$$QI = 13 * IRI \quad (1)$$

Quanto a classificação da condição funcional das rodovias por meio do IRI, o DNIT (2017) indica cinco categorias, de excelente a péssimo. Ao analisar as condições de conforto do usuário, Bueno (2019) informa que valores de irregularidade menores que 2,7 m/km são os que apresentam melhores resultados. Outrossim o autor expõe que a trafegabilidade da via, considerando velocidades usuais de

DOI: [10.29327/1430212.49-97](https://doi.org/10.29327/1430212.49-97)ANÁLISE DE MODELOS DE PREVISÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS
A PARTIR DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO PAVIMENTO

circulação, correspondentes ao intervalo de 60 a 100 km/h, é afetada quando o IRI obtido ultrapassa os 3,5 m/km.

Desse modo, a previsão da irregularidade longitudinal possibilita o diagnóstico da ruptura funcional do pavimento e seus eventuais efeitos aos que trafegam na via (DOMINGUES, 2004). No decorrer do tempo, organizações público-privadas se ancoraram em modelos de previsão do IRI, desenvolvidos por variados pesquisadores e instituições, para gerenciar pavimentos e executar intervenções (BARELLA, 2008). Entre os modelos de estudo, percebe-se a utilização e combinação de variados parâmetros associados às condições locais encontradas para calibrar suas equações, dentre as quais se sobressaem a idade do pavimento, o tráfego e condição funcional da estrutura. Ainda, recebem grande destaque a aplicação do IRI inicial, tipo de clima, tipo de solo, dano médio acumulado e defeitos. A fim de possibilitar tal modelagem de maneira apropriada para as condições brasileiras e reduzir o empirismo com o uso de parâmetros mecanicistas em sua concepção, foi desenvolvido o trabalho de Bueno *et al.* (2022), que se destaca dentre os atuais modelos disponíveis e que em sua elaboração fez uso de dados coletados e analisados em pistas experimentais, buscando calibrar um modelo adequado às condições das vias brasileiras.

Modelo de Bueno *et al.* (2022)

O modelo de previsão da variação temporal do IRI de Bueno *et al.* (2022) é, dentre os demais, o que melhor e de forma mais atual agrega as condições nacionais. Sua elaboração partiu da avaliação e processamento de dados coletados em pistas do Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul. Assim, ocorreu o desenvolvimento de uma equação empírica que, através da utilização do IRI inicial (IRI_i), número de solicitações do eixo padrão (N), deflexão ($D_{MÁX}$) e porcentagem de área trincada (AT), é capaz de prever a irregularidade longitudinal após determinado período, conforme a Equação (2):

$$IRI_{(t)} = IRI_i + \left[(3,54 \cdot 10^{-8} \times N) + (1,42 \cdot 10^{-4} \times (D_{MÁX} \times AT)) \right] \quad (R^2 = 0,77) \quad (2)$$

Ademais, também houve a calibração de um modelo empírico-mecanístico, que além da aplicação da idade do pavimento (AGE), associa o dano médio acumulado limitado à fadiga ($DANO_{LVECD}$) à irregularidade longitudinal encontrada, expresso pela Equação (3):

$$IRI_{(t)} = IRI_i + (0,0124 \times DANO_{LVECD} \times AGE) \quad (R^2 = 0,79) \quad (3)$$

RELAÇÃO ENTRE IRI E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Conforme já descrito, a irregularidade longitudinal do pavimento tem grande influência nos custos operacionais dos veículos, principalmente em despesas como o consumo de combustível. Islam e Buttlar (2012) desenvolveram um estudo em que é possível perceber a influência das condições da rodovia no aumento do custo operacional. Os autores utilizaram o MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*), da AASHTO (2008), para estimar os custos operacionais dos usuários de rodovias com diferentes tipos de veículos e condições de irregularidade. Os resultados obtidos pelos autores indicaram que os custos referentes à evolução da irregularidade, contabilizando consumo de combustível, desgaste dos pneus, depreciação do veículo e manutenção da via variam em uma taxa de 0,00003 a 0,0003 US\$/veículo/milha/IRI, em valores da época.

Dentre os custos mencionados, um dos mais impactantes e que mais elevam o custo operacional é o decorrente do consumo de combustível. Velmurugan *et al.* (2009) destacaram que as características



Eduarda Lemos Rodrigues,
Leônidas Augusto da Silva, Andrielle Ambros de Oliveira,
Renan Gustavo Scherer, Deividi da Silva Pereira,
Luciano Pivoto Specht & Lucas Dotto Bueno

das rodovias, como a irregularidade longitudinal, defeitos no revestimento, projeto geométrico, entre outros, são os principais fatores que interferem no consumo de combustível. A relação entre a condição das rodovias com o consumo de combustível é descrita por Jiao e Bienvenu (2016). Os autores afirmam que a irregularidade da superfície aumenta o trabalho mecânico dissipado dentro do sistema de suspensão do veículo e, conseqüentemente, gera um consumo excessivo de energia, ou seja, um aumento no consumo de combustível. Ademais, é importante ressaltar que o consumo está diretamente relacionado à emissão de Gases do Efeito Estufa (GEEs). De acordo com a CNT (2023), o setor de transporte é responsável por 35% do consumo energético do Brasil, e dentro desse percentual, 93,9% é oriundo do transporte rodoviário. Essa energia provém de combustíveis, em sua maioria, não renováveis e emitem gases e partículas através da combustão, que contribuem para o aumento do efeito estufa. Dessa forma, é evidente a extrema relevância do assunto em termos ambientais, principalmente na redução da emissão de GEEs por meio da melhora dos pavimentos.

METODOLOGIA

Para a pesquisa, foi realizada uma revisão bibliográfica de literatura técnico-científica, por meio de periódicos, artigos, teses e dissertações, a fim de organizar um conjunto de modelos que estimam o consumo de combustível ao longo dos anos utilizando como um dos parâmetros a irregularidade longitudinal do pavimento.

Após a compilação deste conjunto de modelos de consumo, foi simulada a sua aplicação em veículos do tipo automóvel, caminhão a diesel e semirreboque, para valores de IRI de 1,8; 2,7; 3,5; 5; 6; e 8 m/km em planilha eletrônica, buscando identificar o comportamento de cada um frente à irregularidade longitudinal do pavimento. O modelo HDM-4 (2006) foi simulado no próprio software devido ao fato de ter um desdobramento mais complexo. Foi utilizado um banco de dados único de valores para as variáveis envolvidas, como apresenta a Tabela 1, e os coeficientes de regressão originais dos diferentes modelos.

Tabela 1. Parâmetros empregados para simulações dos modelos (AUTORES, 2024)

Parâmetros	Tipos de Veículos		
	Automóvel	Caminhão	Semirreboque
Rampas	15 m/km	15 m/km	15 m/km
Rampas/km	2	2	2
Curvatura horizontal média	75°/km	75°/km	75°/km
Superelevação	3%	3%	3%
Limite de velocidade	80 km/h	80 km/h	80 km/h
Zona Climática	Tropical	Tropical	Tropical
Espessura do revestimento	75 mm	75 mm	75 mm
Número estrutural	2,45	2,45	2,45
CBR do subleito	8%	8%	8%
Grau de compactação da mistura asfáltica	97%	97%	97%
IRI inicial	1,0 m/km	1,0 m/km	1,0 m/km
Profundidade da Macrotextura	7 mm	7 mm	7 mm
Tempo de análise	10 anos	10 anos	10 anos
Crescimento do tráfego	0%	0%	0%
Marcha	5	5	5
Aceleração da gravidade	9,81 m/s ²	9,81 m/s ²	9,81 m/s ²



DOI: 10.29327/1430212.49-97

ANÁLISE DE MODELOS DE PREVISÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS A PARTIR DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO PAVIMENTO

Altitude da rodovia	0,0 m	0,0 m	0,0 m
Pressão atmosférica	1013,5 mbar	1013,5 mbar	1013,5 mbar
Massa específica do ar	1,2 kg/m ³	1,2 kg/m ³	1,2 kg/m ³
Temperatura Ambiente	22 °C	22 °C	22 °C
Velocidade do ar	14,4 km/h	14,4 km/h	14,4 km/h
Área frontal do veículo	1,9 m ²	5,0 m ²	9,0 m ²
Coefficiente aerodinâmico	0,462	0,678	0,976
Diâmetro dos pneus	0,6 m	1,5 m	1,5 m
Número de pneus	4	6	18
Eficiência de transmissão	90%	86%	86%
Fator de conversão combustível para potência	0,067 mL/kW/s	0,057 mL/kW/s	0,055mL/kW/s
Consumo em marcha lenta	0,36 mL/s	0,37 mL/s	1,12 mL/s
Potência nominal máxima do motor	70 kW	100 kW	300 kW
Velocidade do motor em marcha lenta	800 rpm	500 rpm	500 rpm

MODELOS DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Ao longo dos anos, variados autores desenvolveram modelos de previsão de consumo de combustível pelos veículos, em que levam em consideração, principalmente, características da via, do veículo e ambientais.

A partir de uma revisão bibliográfica na literatura técnico-científica, foram encontrados e elencados modelos de previsão de consumo de combustível desenvolvidos a partir da década de 80, concebidos em cenário nacional e internacional. Dentre os modelos disponíveis, destacam-se o modelo do GEIPOT (1982); o modelo Sul-Africano (1984); o do HDM-III (1987); o de *Du Plessis; Visser e Curtayne* (1990); o do *National Research Council of Canada – NRC* (2006); o do HDM-4 (2006); o de *Svenson e Fjeld* (2012); o do VTI (2012); o de *Okte; Al-Qadi e Ozer* (2019); e o MapEUR (2021). A seguir são apresentados e descritos, em ordem cronológica, tais modelos referenciados, assim como os principais parâmetros considerados em cada um para realizar a previsão de consumo. O detalhamento destes modelos está disponível nos seus respectivos trabalhos originais.

Modelo do GEIPOT (1982)

O Grupo Executivo para a Integração da Política de Transportes (GEIPOT) participou da pesquisa internacional “*Research on the Interrelationships Between Costs of Highway Construction, Maintenance and Utilization*” desenvolvida no Brasil na metade da década de 70, onde foram realizadas inúmeras avaliações para quantificar as características das rodovias, os custos de intervenção e os custos operacionais dos veículos. Entre os objetivos atingidos, está a elaboração de modelos empíricos para estimar o consumo de combustível dos veículos, havendo sido gerados sete modelos, um para cada classe de veículos consideradas no estudo: automóveis, ônibus, utilitários, caminhões leves (gasolina), caminhões leves (diesel), caminhões pesados e semirreboque. Estes modelos utilizam como parâmetros o greide da via (GR), o QI, o peso do veículo (P), a marcha do veículo (MARC), e a velocidade (S). Destaca-se para o presente trabalho a equação 5, que representa o consumo de combustível de automóveis, a equação 6, para caminhões a diesel e a equação 7, para semirreboques.

$$C = 0,142e^{0,02287S+0,000855(S)GR+0,03782(GR+3)P+0,2695(5-MARC)+0,0001024(QI)(GR+14)} \quad (5)$$



Eduarda Lemos Rodrigues,
Leônidas Augusto da Silva, Andrielle Ambros de Oliveira,
Renan Gustavo Scherer, Deividi da Silva Pereira,
Luciano Pivoto Specht & Lucas Dotto Bueno

$$C = 0,1826e^{0,0325S+0,00208(GR)S+0,0254(GR+1)P+0,2333(S-MARC)+0,0014005(QI)} \quad (6)$$

$$C = \left(\frac{2,54}{\sqrt{1+G}} \right) e^{[0,00505+0,00029(GR+1)P+0,00035(QI)]S} \quad (7)$$

Modelo Sul-africano (1984)

Em *Bester* (1984) é apresentado um modelo sul-africano que possibilita a previsão do consumo de combustível em velocidade constante, dependente de calibração experimental. O seu conceito principal leva em consideração o deslocamento do veículo, para o qual há a necessidade de uma energia superior àquela gerada por três forças que se opõem ao movimento: a resistência ao rolamento (R_r); a resistência do ar (R_a); e a resistência devido ao greide da rodovia (R_g). Essas resistências são calculadas através de variáveis como o greide da rodovia (G), o QI e outros parâmetros do veículo que influenciam na energia despendida com perdas na transmissão e com a fricção interna. Desta forma, o modelo, apresentado na equação 8, utilizou como parâmetros: velocidade, greide da rodovia, e funções (p_1 , p_2 , p_3 e p_4) que dependem do fator de conversão de combustível, da massa do veículo, da eficiência da transmissão, da projeção da área frontal do veículo, do coeficiente de arrasto dinâmico, da massa específica do ar, da gravidade e de coeficientes de resistência ao rolamento.

$$F = p_1 + \frac{p_2}{V} + p_3V^2 + p_4G \quad (8)$$

Modelo do HDM-3 (1987)

Descrito por Watanada *et al.* (1987), este modelo de previsão do consumo de combustível possui caráter mecânico e utiliza dados experimentais obtidos no Brasil entre as décadas de 70 e 80, admitindo o cálculo do consumo em L/1000 veículos-km a partir do consumo instantâneo em subida (UFC_u) e em descida (UFC_d), expressos em mL/s, da velocidade em subida (V_u) e em descida (V_d) e coeficientes de calibração. Esse consumo instantâneo, apresentado na equação 9, necessita de parâmetros que envolvem o pavimento, como o somatório de subidas e descidas, e o coeficiente de rolamento do pavimento, que engloba o QI e constantes calibradas para o modelo.

$$FL = 500\alpha_1\alpha_2 \left(\frac{UFC_u}{V_u} + \frac{UFC_d}{V_d} \right) \quad (9)$$

Modelo de Du Plessis, Visser e Curtayne (1990)

O modelo publicado por *Du Plessis; Visser e Curtayne* (1990) possui o mesmo conceito do modelo sul-africano disponível em *Bester* (1984), como é apresentado na equação 10. A diferença entre os modelos é que o modelo de 1990 considera a macrotextura do pavimento e a temperatura dos pneus nos coeficientes de resistência ao rolamento.

$$F = p_1 + \frac{p_2}{V} + p_3V^2 + p_4G \quad (10)$$

DOI: [10.29327/1430212.49-97](https://doi.org/10.29327/1430212.49-97)

ANÁLISE DE MODELOS DE PREVISÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS A PARTIR DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO PAVIMENTO

Modelo do NRC (2006)

O modelo produzido para a *National Research Council of Canada* (NRC), elaborado por *Taylor e Patten* (2006) destaca-se por possuir constantes definidas para automóveis e caminhões de acordo com as estações do ano (C_1 até C_9) e considerar o IRI na sua equação. Outros parâmetros como o greide da rodovia (Grade), a temperatura da via ou ambiente ($P_{av_{temp}}$), tipo de revestimento (P_{vash} quando o revestimento for asfáltico, e P_{vcomp} quando o revestimento for composto por concreto e asfalto), massa total do veículo (Load - somente para caminhões), velocidade (*Speed*) e o quadrado da velocidade absoluta do ar (*AirSpdSq*), também são empregados na estimativa do consumo de combustível do modelo apresentada na equação 11.

$$FuelCon = C_1 + C_2 \cdot P_{vash} + C_3 \cdot P_{vcomp} + C_4 \cdot IRI + C_5 \cdot Grade + C_6 \cdot Load + C_7 \cdot Pav_{temp} + C_8 \cdot Speed + C_9 \cdot AirSpdSq \quad (11)$$

Modelo do software HDM-4 (2006)

Entre os modelos de previsão de consumo de combustível pesquisados, compete evidenciar o modelo do software HDM-4, descrito por *Odoki e Kerali* (2006). Além de possuir caráter mecânico, ele envolve diversos parâmetros, como a altitude da rodovia, características de tráfego, greide, geometria do pavimento, IRI, profundidade da macrotextura e parâmetros em relação ao veículo, além de permitir calibrações de condicionantes locais e temporais, relacionados às vias e aos veículos. A aplicação do modelo possuiu diversas etapas, onde são realizadas estimativas separadamente cada período de tráfego e para subidas e descidas, relacionando com o nível de serviço da via ao longo do ano. A irregularidade, representada pelo IRI, está presente no coeficiente de resistência ao rolamento do pavimento, um dos parâmetros para o cálculo da resistência total ao rolamento, que influencia na potência total requerida para o movimento constante do veículo ($PTOT_{kpu}$), uma das variáveis da equação principal de previsão do consumo instantâneo de combustível estimado pelo software. A taxa de consumo em marcha lenta ($IDLE_{FUEL}$), o fator de eficiência consumo-energia do veículo ($ZETA_{kpu}$), e o fator de consumo adicional devido as alterações de velocidade do veículo ($dFUEL_{kpu}$), são os outros parâmetros da equação principal do consumo, apresentada na equação 12.

$$IFC_{kpu} = Max[IDLE_{FUEL_k}; ZETA_{kpu} \cdot PTOT_{kpu} \cdot (1 + dFUEL_{kpu})] \quad (12)$$

Modelo de *Svenson e Fjeld* (2012)

O modelo desenvolvido por *Svenson e Fjeld* (2012) foi elaborado para condições da Suécia e exclusivamente para caminhões semirreboques. Tendo caráter empírico, o modelo teve como conceito correlacionar características da via com a velocidade, em diferentes segmentos ao longo de uma rota de transportes usual para o tipo de veículo considerado no país. Após diversas regressões múltiplas, os autores estabeleceram o modelo apresentado na equação 13, que tem como parâmetros o greide da via (G) e o IRI.

$$F = 46,19 + 22,33 \cdot G + 1,47 \cdot G^2 + 7,70 \cdot IRI \quad (13)$$

Modelo do VTI (2012)

Desenvolvido para o *Statens väg- och transportforskningsinstitut* (Instituto Nacional Sueco de Pesquisa Rodoviária – VTI), este modelo sueco pertence ao projeto internacional MIRIAM (*Models for Rolling Resistance In Road Infrastructure Asset Management Systems*) e utiliza características de



Eduarda Lemos Rodrigues,
Leônidas Augusto da Silva, Andriele Ambros de Oliveira,
Renan Gustavo Scherer, Deividi da Silva Pereira,
Luciano Pivoto Specht & Lucas Dotto Bueno

veículos e rodovias usuais nas vias administradas pela agência nacional sueca. Apresentando caráter mecanístico-empírico, o modelo consiste em um conjunto de equações para diferentes veículos, cujas variáveis contemplam a velocidade do veículo, a irregularidade longitudinal do pavimento (IRI, em m/km), a profundidade da macrotextura do revestimento, o grau de curvatura médio da rodovia (rad/km), e o greide da rodovia. O modelo geral, que é apresentado na equação 14, parte de coeficientes do próprio modelo (c_0 até c_4), da velocidade de rotação do eixo de entrada na caixa de engrenagens (NRs), e da função Mind, que depende de parâmetros como a potência do motor e a fricção interna do motor.

$$Fct = c_0 \cdot (Mind + c_1 \cdot Mind^2 + c_2 \cdot Mind^3) \cdot (NRs + c_3 \cdot NRs^2 + c_4 \cdot NRs^3) \quad (14)$$

Modelo de Okte; Al-Qadi e Ozer (2019)

O estudo produzido por Okte; Al-Qadi e Ozer (2019) buscou identificar os efeitos da condição do pavimento em seu custo do ciclo de vida, elaborando um modelo de previsão do consumo de combustível. Os autores utilizaram o MOVES (*motor vehicle emission simulator*) para estimar a energia a ser fornecida pelo motor para diferentes condições de irregularidade longitudinal do pavimento, determinada pelo IRI. Para esse processo, foi variada a velocidade simulada e o nível de emissão de poluentes, assim associando cada situação a um valor correspondente de IRI. Além disso, para cada nível de emissão simulado, foi calculada a energia correspondente a ser obtida do combustível e gerado um banco de dados. Com isto, foi realizada uma correlação da energia necessária com a velocidade e a irregularidade longitudinal do pavimento. O modelo é apresentado na equação 12 e tem como variáveis: coeficientes de regressão (k_a , d_a , k_c , d_c , p e b), velocidade do veículo (v) e irregularidade longitudinal (IRI).

$$RSI_{t=0}^{Energy}: \hat{E}(v, IRI) = \frac{p}{v} + k_a \cdot IRI + d_a + b \cdot v + (k_c \cdot IRI + d_c) \cdot v^2 \quad (15)$$

Modelo do MapEUR (2021)

O *software* MapEUR (*Map of Energy Use on Road*), apresentado por Samson et al. (2021), estima o consumo energético de caminhões ao longo de uma rota e expõe os resultados na forma de mapas. Para tal, realiza a determinação da força de tração necessária para o veículo percorrer um segmento rodoviário a uma determinada velocidade (v), a partir de parâmetros como: greide da rodovia (Δ), massa do veículo (m), força de tração (F_t), gravidade (g), densidade do ar (ρ), área frontal do veículo (Ac_d), velocidade do vento (v_w) e o coeficiente de resistência ao rolamento (c_r), que depende de três fenômenos: a deformação viscoelástica do pneu, a irregularidade longitudinal (IRI) e a deformação viscoelástica da estrutura. Assim, o modelo geral, representado na equação 16, foi desenvolvido para estimar a força necessária ao movimento, a partir da qual pode-se determinar a energia necessária e o consumo de combustível.

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F_t - m \cdot g \cdot (\Delta + c_r) - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Ac_d (v - v_w)^2 \quad (16)$$

SIMULAÇÕES DOS MODELOS DE PREVISÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

A fim de comparar a previsão de consumo de combustível obtida pelos diferentes modelos

DOI: [10.29327/1430212.49-97](https://doi.org/10.29327/1430212.49-97)ANÁLISE DE MODELOS DE PREVISÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS
A PARTIR DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO PAVIMENTO

apresentados, estes foram simulados para três tipos de veículos, variando os valores de IRI para 1,8; 2,7; 3,5; 5; 6 e 8 m/km. Na sequência, com os resultados obtidos, foram plotados gráficos dos diferentes modelos, para cada tipo de veículo. A análise foi realizada para automóveis, exposta na Figura 1, para caminhão diesel, presente na Figura 2 e para semirreboque, conforme Figura 3.

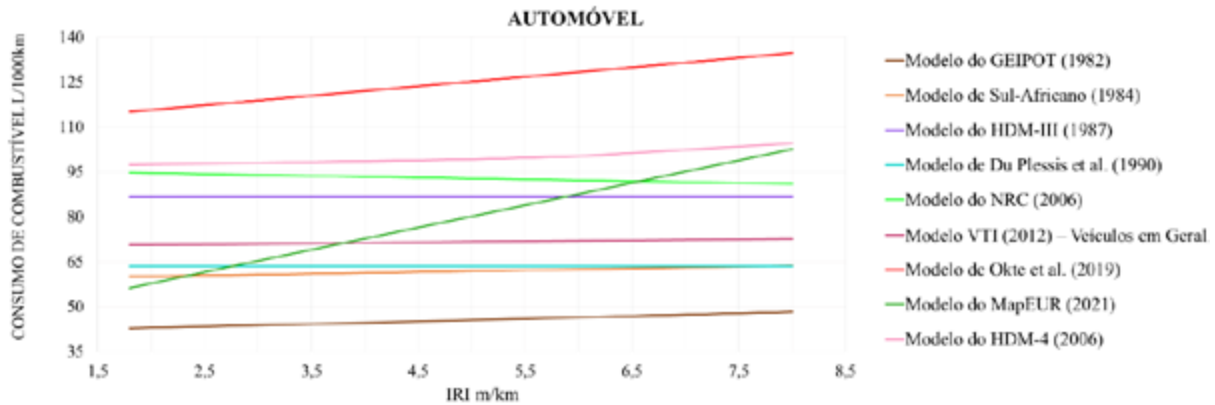


Figura 1. Gráfico de simulação de estimativa de consumo de combustível para automóveis (AUTORES, 2024)

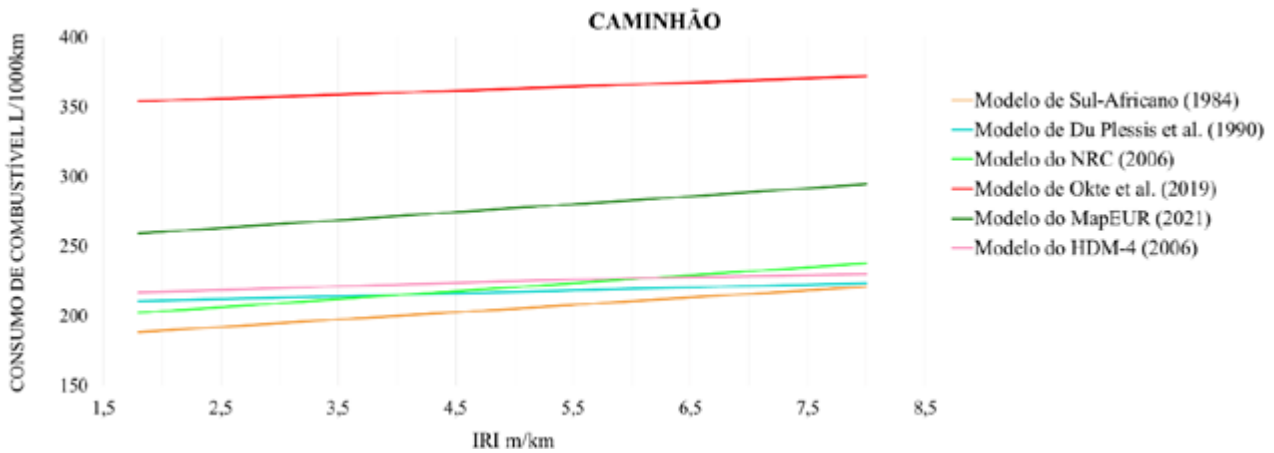


Figura 2. Gráfico de simulação de estimativa de consumo de combustível para caminhões (AUTORES, 2024)

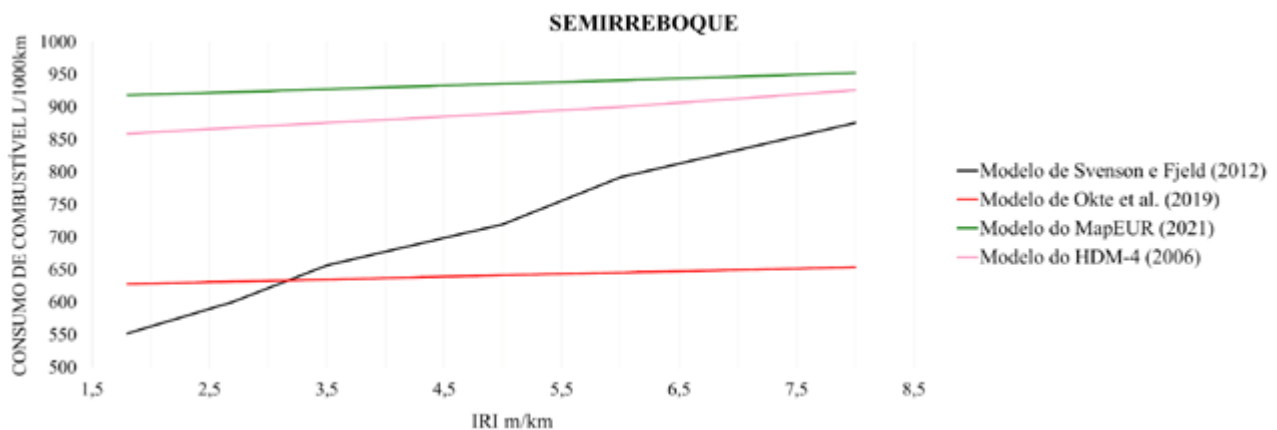


Figura 3. Gráfico de simulação de estimativa de consumo de combustível para semirreboques (AUTORES, 2024)



A partir das simulações realizadas, foi possível avaliar a interação dos modelos com a evolução do IRI. Conforme demonstrado nas Figuras 1, 2 e 3, os resultados dos modelos do GEIPOT (1982) e Sul-africano (1984), de caráter empírico, indicam que tais modelos tendem a se tornar ultrapassados por não conseguirem contemplar a evolução tecnológica. Isto é mais evidente nas Figuras 1 e 2, que demonstram que estes modelos possuem valores baixos em comparação aos demais, alcançando respectivamente, 48,24 L/ 1000 Km e 63,77 L/ 1000 Km.

O modelo de *Du Plessis; Visser e Curtayne* (1990), que possui o mesmo conceito que o modelo Sul-africano (1984), comprova que mesmo acrescentando outros parâmetros, ainda possuem semelhanças entre si, sendo possível observar uma pequena diferença apenas na Figura 2.

O modelo do NRC (2006) para automóveis realça-se por possuir uma tendência diferente dos demais, como pode ser observado na Figura 1, que expõe uma redução de 3,89% do consumo com o aumento do valor do IRI. Por sua vez, o modelo para caminhões dos mesmos autores, como indicado na Figura 2, apresenta o aumento 17,58% do consumo de combustível com o crescimento do IRI. Assim, o modelo demonstra inconstância por não manter um padrão em sua representação do consumo.

Os modelos de *Du Plessis; Visser e Curtayne* (1990), do HDM-3 (1987) e do VTI (2012), foram modelos que demonstraram dificuldade em captar a influência IRI, visto que, a porcentagem do aumento do consumo foi inferior a 3% para o modelo do VTI, já para os modelos de *Du Plessis; Visser e Curtayne* (1990) e do HDM-3 (1987) o consumo teve um percentual menor que 0,5%.

Os modelos mais atuais, de *Okte; Al-Qadi e Ozer* (2019) e MapEUR (2021), são os modelos mais convenientes na relação da influência do consumo no IRI, por possuírem os acréscimos mais relevantes na evolução da irregularidade. Sendo que para os automóveis e considerando valores de IRI de 1,8 m/Km até 8 m/Km, o modelo de *Okte; Al-Qadi e Ozer* (2019) gerou um aumento no consumo de combustível de 17,07% e o modelo do MapEUR (2021) um aumento de 82,03%.

O modelo de *Svenson e Fjeld* (2012) desenvolvido especialmente para caminhões semirreboque, demonstrou que a irregularidade impacta demasiadamente no resultado do consumo, tendo como aumento 58,65% de consumo, como é observado na Figura 3.

Dos modelos avaliados, o que conseguiu manter regularidade na sua representação foi o HDM-4 (2006), que demonstrou progressão gradual na evolução do IRI, como observado nas Figuras 1, 2 e 3, tendo respectivamente como aumento de consumo 7,39%, 6,01% e 7,74% na comparação entre os valores de IRI de 1,8 e 8 m/km.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O consumo de combustível é um importante componente dos custos operacionais dos veículos e uma fonte de emissão de GEEs. Conforme demonstrado no presente trabalho, ele guarda relação com, dentre outros fatores, a condição funcional do pavimento. Prever a variação dessa condição, representada especialmente pela irregularidade longitudinal do pavimento, e como isso se reflete na quantidade de combustível utilizada pelos veículos é relevante para um melhor gerenciamento dos pavimentos e a busca pela minimização deste consumo. Para tal, diferentes modelos de previsão foram identificados na literatura e comparados entre si. Desta avaliação, foi possível constatar que as previsões geradas divergem entre si, o que em parte se deve ao caráter empírico de alguns modelos. Além disso, as calibrações empregadas, mesmo em modelos mais avançados, podem estar defasadas para as condições locais e atuais de pavimentos e da frota de veículos. Isso indica uma necessidade da atualização de tais modelos ou elaboração de novos. Dentre os atualmente disponíveis, destaca-se o modelo do HDM-4, que apresentou observações mais consistentes na previsão de consumo e que,



DOI: [10.29327/1430212.49-97](https://doi.org/10.29327/1430212.49-97)

ANÁLISE DE MODELOS DE PREVISÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS
A PARTIR DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO PAVIMENTO

além disso, possui um caráter mais mecanístico, fazendo com que se apresente como uma melhor alternativa para estudos da influência da condição funcional do pavimento no consumo de combustível que os demais.

AGRADECIMENTOS

À ANP/PETROBRAS, CNPq e FAPERGS pelas bolsas dos autores e pelo apoio às pesquisas do GEPPASV/UFSM.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG). Washington (EUA), 2008.

BARELLA, R. M. Contribuição Para a Avaliação da Irregularidade Longitudinal de Pavimentos com Perfilômetros Inerciais. 362 p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2008.

BERNUCCI, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. Basic Training for Engineers. Abeda, Rio de Janeiro, 2022.

BESTER, C. J. *Effect of Pavement Type and Condition on the Fuel Consumption of Vehicles. Transportation Research Record 1000*, pg 28-38, 1984.

BUENO, L. D. Contribuição para a previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. 2019.

BUENO, L. D.; PEREIRA, D. S.; SPECHT, P. P.; NASCIMENTO, L. A. H.; SCHUSTER, S. L.; FRITZEN, M. A.; KIM, Y. R.; BACK, A. H. *Contribution to The Mechanistic-Empirical Roughness Prediction in Asphalt Pavements, Road Materials and Pavement Design*, 2022, DOI: 10.1080/14680629.2022.2029758.

CNT. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. Pesquisa CNT de Rodovias. ed. 2023. Brasília, DF.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (DNER). PRO 182/94. Medição da Irregularidade de superfície de pavimento com sistemas integradores IPR/USP e Maysmeter. Rio de Janeiro/RJ, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES (DNIT). Manual de Restauração. Publicação IPR 720. Rio de Janeiro/RJ, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES (DNIT). Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes – Volume 1. Brasília, DF, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES (DNIT). Levantamento do perfil longitudinal de pavimentos com perfilômetro inercial. DNIT 442/2023 - PRO. Ministério dos Transportes, Brasília. 2023.

DOMINGUES, F. A. A. Notas de aula da disciplina: Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos - PTR-5008. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Curso de pós-graduação em engenharia de transportes. São Paulo, 2004.

DU PLESSIS, H. W., VISSER, A. T., CURTAYNE, P. C. *Fuel Consumption of Vehicles as Affected by Road-Surface Characteristics. Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies, ASTM STP 1031, W. E. Meyer and J. Reichert, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 480-496.*

EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES - GEIPOT. *Research on the Interrelationships Between Costs of Highway Construction Maintenance and Utilization; final report - 1981*. Brasília, 1982. 12v. il.



Eduarda Lemos Rodrigues,
Leônidas Augusto da Silva, Andriele Ambros de Oliveira,
Renan Gustavo Scherer, Deividi da Silva Pereira,
Luciano Pivoto Specht & Lucas Dotto Bueno

HELLMANN, A. Análise do consumo de combustível de um automóvel de passeio em trajeto com faixas elevadas para travessia de pedestres e trajeto livre. Projeto de Graduação. Curso de Graduação em Engenharia de Energia. Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, 2018.

ISLAM, S; BUTLAR, W. G. *Effect of Pavement Roughness on User Costs. Transportation Research Record*, Nº 2285, Washington, D.C., p. 47–55. *Washington* (EUA), 2012. DOI: 10.3141/2285-06.

JIAO, X; BIENVENU, M. *Pavement-Vehicle Interaction (PVI) and Comparative Highway Fuel Consumption: An Extended Field Investigation. 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington* (EUA), 2016.

LEMLIN, M. *Development of Tools for Performance Measurement. Final Report, PIARC Committee on Performance of Road Administrations (C15), World Road Association*, 1998.

ODOKI, J. B.; KERALI, H. G. R. Analytical Framework and Model Descriptions. The Highway Development and Management Series, versão 2.0, v.4. *The World Road Association (PIARC), Paris and The World Bank, Washington D.C.*, 2006, 1184p.

OKTE, E.; AL-QADI, I. L.; OZER, H. *Effects of pavement condition on LCCA user costs. Transportation Research Record*, p. 339-350, 2019.

PATERSON, W. D. O. *Road Deterioration and Maintenance Effects - Models for Planning and Management*. 472 p. *World Bank. Washington* (EUA), 1987.

SAMSON, N.; LEVESQUE, W.; BÉGIN-DROLET, A.; LÉPINE, J. *Modelling and Mapping of Heavy-Vehicle Energy Consumption. In: Proc., 16th International Symposium on Heavy Vehicle Transport & Technology, HVTT16, Université Laval*. 2021.

SAYERS, M. W; GILLESPIE, T. D; QUEIROZ, C. A. V. *The International Road Roughness Experiment - Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements*. 468 p. *World Bank Technical Paper Number 45. Washington* (EUA), 1986.

SAYERS, M. W. *On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile. Transportation Research Record 1501. p. 1-12. Washington* (EUA), 1995.

SVENSON, G.; FJELD, D. *The influence of road characteristics on fuel consumption for logging trucks*. In: 12th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology, 2012.

TAYLOR, G. W., PATTEN, J. D. *Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – Phase III. Nation Research Council of Canada*, 2006.

VELMURUGAN, S.; MADHU, E.; RAVINDER, K.; GANGOPADHYAY, S. Updation of Road User Cost for Economic Evaluation of Road Projects. *Indian Journal of Transport Management*. p. 205-225. *Jul-Sep* 2009.

WATANATADA, T; HARRAL, C. G; PATERSON, W. D. O; DHARESHWAR, A. M; BHANDARI, A; TSUNOKAWA, K. *The Highway Design and Maintenance Standards Model – Voll: Description of the HDM-3 Model*. 290 p. *Washington* (EUA), 1987.



GESTÃO DE ATIVOS RODOVIÁRIOS ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DATA-DRIVEN E BIM

*Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli^{1,3}; Marcelo Franco Porto²; Flaviane Beltrão Silva^{1,3}
Matheus Guimarães Novais^{1,3}*

RESUMO

O tema abrange a convergência entre a Gestão de Ativos Rodoviários, a Modelagem da Informação Rodoviária (*BIM*) e a abordagem *Data-Driven*. Visto que a gestão de ativos é baseada em uma análise interdisciplinar de dados rodoviários correlacionados, o objetivo deste trabalho é a integração de dados estruturados e multidisciplinares para produzir uma representação de um recurso em todo seu ciclo de vida, como base da transformação digital. Ao adotar uma abordagem *Data-Driven - BIM*, visamos otimizar a manutenção, a alocação de recursos e o planejamento estratégico. Essa sinergia vem possibilitando a gerência de Gestão de Ativos Rodoviários do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais - DER-MG, trabalhar com uma visão holística do cenário dos ativos rodoviários. A combinação de informações provenientes de diversas fontes, tratadas, modeladas e estruturadas, em uma representação unificada integrada ao banco de dados, proporciona uma visão abrangente e precisa dos ativos rodoviários. Gerir os dados adequadamente é fundamental para prever e mitigar potenciais problemas, impulsionar tecnologias, incluindo aquelas relacionadas à segurança rodoviária, e informar decisões para atender às necessidades do futuro. Este modelo, focado especificamente na gestão de informações dos ativos rodoviários, traz inovação no processamento e análise de dados das rodovias estaduais do DER-MG.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de ativos rodoviários; *Data-Driven*; *BIM*; Tomada de decisão; Inovação.

ABSTRACT

The topic covers the convergence between Road Asset Management, Road Building Information Modeling (*BIM*) and the *Data-Driven* approach. Since asset management is based on an interdisciplinary analysis of correlated road data, the objective of this work is the integration of structured and multidisciplinary data to produce a representation of an asset throughout its lifecycle, as a basis for digital transformation. By adopting a *Data-Driven - BIM* approach, we aim to optimize maintenance, resource allocation and strategic planning. This synergy has enabled the Asset Management Road of the Department of Highways of the State of Minas Gerais - DER-MG, to work with a holistic view of the road asset scenario. The combination of information from different sources, treated, modeled and structured, in a unified representation integrated into the database, provides a comprehensive and accurate view of road assets. Managing data properly is essential to predicting and mitigating potential problems, leveraging technologies, including those related to road safety, and informing decisions to meet the needs of the future. This model, specifically focused on information management of road assets, brings innovation in the processing and analysis of data from DER-MG state highways.

KEY WORDS: Management of road assets; *Data-Driven*; *BIM*; Decision making; Innovation.

¹ Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais - DER-MG, e-mail: bruna.beleigoli@der.mg.gov.br; flaviane.beltrao@der.mg.gov.br; matheus.novais@der.mg.gov.br .

² Coordenador do Programa de Mestrado em Infraestrutura de Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, e-mail: marceloport@ufmg.br.

³ Mestrando em Infraestrutura de Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, e-mail: brunabeltrao@ufmg.br; flavianebeltrao@ufmg.br; matheusnovais@ufmg.br



INTRODUÇÃO

O modo de transporte rodoviário tem papel de destaque no modelo brasileiro de desenvolvimento econômico (Fleury et al., 2000). Este é um modal indispensável para a economia e o desenvolvimento da infraestrutura rodoviária. Desempenha um papel fundamental na segurança, eficiência e sustentabilidade das redes de transporte. Diaz-Sarachaga et al. (2017), afirmam que a influência do setor de transportes torna-se ainda mais relevante para economias emergentes que buscam investimentos significativos na expansão e manutenção de sua infraestrutura de transportes, como é o caso do Brasil.

Elementos físicos e infra-estruturas que compõem a via, como o próprio pavimento, sinalização, obras de arte especiais, são o que chamamos de Ativos Rodoviários. Esses ativos estão sujeitos a desgaste, deterioração e redução progressiva da vida útil ao longo do tempo, exigindo uma gestão cuidadosa para garantir sua funcionalidade e durabilidade.

Uma gestão eficaz de ativos rodoviários envolve a coleta e análise de dados sobre o estado das condições, a realização de manutenção preventiva e corretiva, o planejamento de investimentos e a implementação de medidas para garantir a segurança dos usuários.

Esse trabalho abrange a interação entre gestão de ativos rodoviários, modelagem de informação *BIM* e a abordagem *Data-Driven*, que se baseia na coleta, análise e utilização de dados para apoiar decisões estratégicas. Se propõe a investigar como a integração da metodologia *BIM* com uma abordagem *Data-Driven* pode contribuir para superar esses desafios e melhorar a eficiência e eficácia da gestão de ativos rodoviários.

Conceitos Fundamentais e Definições

Segundo as normas NBR ISO 55.000, 55.001 e 55.002, ativo é um item, algo ou entidade que tem valor real ou potencial para uma organização. Este valor pode ser tangível ou intangível, financeiro ou não financeiro, e inclui a consideração de riscos e passivos. Ele pode ser positivo ou negativo, em diferentes estágios da vida do ativo.

A Gestão de Ativos consiste em boas práticas que visam proporcionar um enquadramento para o estabelecimento de políticas, governança e processos que permitam a organização ir ao encontro dos seus objetivos estratégicos.

O Manual Internacional de Gerenciamento de Infraestrutura (IIMM) define Gerenciamento de Ativos como: “A combinação de práticas de gestão, financeiras, econômicas, de engenharia e outras práticas aplicadas a ativos físicos com o objetivo de fornecer o nível de serviço exigido da maneira mais econômica.

A Gestão de Ativos DER-MG tem como ponto de partida a reestruturação do Sistema de Gerência de Pavimentos - SGP, que se define como a interação mútua de um conjunto de eixos temáticos para planejamento, projeto, construção e manutenção dos pavimentos e demais elementos da malha rodoviária. Possui as seguintes diretrizes estratégicas: reunir os dados da instituição com o objetivo de dar publicidade a essas informações como preconizam os princípios da administração pública, prezar pela eficiência dos investimentos públicos disponíveis; buscar um transporte rodoviário seguro, compatível e econômico; buscar alternativas para aumento da eficiência da logística de

DOI: [10.29327/1430212.49-94](https://doi.org/10.29327/1430212.49-94)

GESTÃO DE ATIVOS RODOVIÁRIOS ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DATA-DRIVEN E BIM

transportes; e adotar parcerias com a sociedade civil que contribuam para consecução de seus objetivos. (*Portaria DER-MG n° 3955/2022*).

Building Information Modeling (*BIM*) que em português significa Modelagem da Informação da Construção, surgiu em meados da década de 1970, a partir da publicação de um artigo científico escrito por *Eastman et al.* (1974). É uma metodologia que envolve um processo holístico de criação e uso de modelos digitais inteligentes para planejar, projetar, construir e gerenciar infraestruturas físicas. *Eastman* define *BIM* como “uma tecnologia de modelagem e um conjunto associado de processos para criar, comunicar e analisar modelos de construção.

No contexto rodoviário, o *BIM* pode ser aplicado para criar modelos detalhados que representam com precisão a geometria, materiais e componentes das estradas e estruturas associadas. Esses modelos podem ser enriquecidos com informações adicionais, como dados de desempenho, custos e cronogramas de manutenção.

A abordagem *Data-Driven*, também conhecida como *Data-Driven Decision Making* (*DDDM*) é uma prática de coleta e análise e utilização de dados para apoiar as decisões, permitindo uma análise mais objetiva e baseada em evidências.

Na literatura não há um consenso sobre um processo específico a seguir para a abordagem *DDDM*, embora muitos autores a abordem sob a ótica dos dados, entende-se que ela diz respeito ao contexto da gestão estratégica.

Para Berndtsson (2018), Ghandi, Bathia e Dev (2021) e Kumar (2021), as principais características de uma abordagem disciplinada e orientada por dados para a tomada de decisão pressupõe a utilização de *KPIs* (*Key Performance Indicators* ou Indicadores-Chave de Desempenho) alinhados às estratégias, orientando a lógica das tomadas de decisão, permitindo assim aprender com os erros, analisar os resultados de más e boas decisões, gerando melhoria dos loops de aprendizagem organizacional.

O oposto de um processo orientado por dados é a tomada de decisões baseadas unicamente na intuição.





Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli,
Marcelo Franco Porto,
Flaviane Beltrão Silva,
Matheus Guimarães Novais

Figura 1- Visão de organização *Data-Driven* (THINK WITH GOOGLE,2024)
Da Silva (2021) faz uma rede de coocorrência de palavras-chave das pesquisas que englobam o tema, que contribuem para a caracterização do estado da arte.

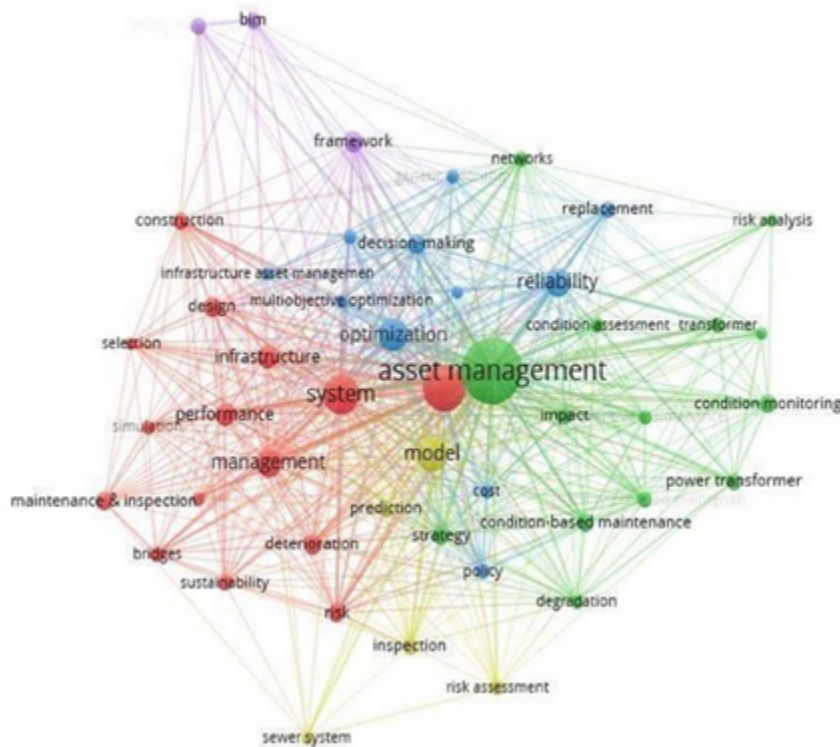


Figura 2- Rede de coocorrência de palavras-chave das pesquisas em manutenção e gestão de ativos (DA SILVA, 2021)

Esse mapeamento corrobora o enfoque desta pesquisa visto que evidencia uma lacuna no estado da arte das pesquisas que englobam a manutenção e a gestão de ativos em não abordar o aspecto organizacional do gerenciamento de manutenção.

Wu, et al. (2004) através de uma revisão crítica de 485 artigos sobre tomada de decisão de operação e manutenção de pontes orientada por dados, citam a necessidade de padronização e integração por falta de procedimentos padrão, tornando isso um grande desafio.

Osichenko e Spielhofer (2018) citam alguns dos principais desafios de gestão ativos rodoviários: Rede rodoviária e taxa de motorização em rápido crescimento; aspectos ambientais e socioeconômicos; novos sistemas de medição; alterações climáticas.

Nesse contexto, surge a necessidade de explorar novas abordagens e ferramentas que possam melhorar a gestão de ativos rodoviários e otimizar o uso de recursos limitados.



DOI: [10.29327/1430212.49-94](https://doi.org/10.29327/1430212.49-94)

GESTÃO DE ATIVOS RODOVIÁRIOS ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DATA-DRIVEN E BIM

METODOLOGIA

Este estudo de caso adotou uma abordagem mista com a combinação de métodos quantitativos e qualitativos para experienciar a integração *BIM* com a abordagem *Data-Driven* na gestão de ativos rodoviários.

A pesquisa foi dividida em três fases principais:

- 1 - Coleta e preparação/transformação dos dados
- 2 - Modelagem e análise dos dados e
- 3 - Avaliação e visualização dos resultados.

1 - Coleta e preparação/transformação dos dados:

Os dados rodoviários, por serem multidisciplinares, têm origem de diversas fontes. A mais robusta delas, é oriunda da campanha de Cadastro Geral das Rodovias, ocorrida entre os anos de 2022 e 2023, em toda extensão da malha rodoviária estadual de Minas Gerais. Foram produzidos através de veículos com câmeras de filmagem acopladas, dispoendo de sistema de georreferenciamento integrado, além de veículos com sensores a laser. Os levantamentos foram obtidos em ambos os sentidos das rodovias (crescente e decrescente), sumarizados pela média desses dados.

Outras fontes como contagens de tráfego, registros de manutenção e inspeção de rodovias, também foram integrados.



Figura 3- Coleta de dados de tráfego (OS AUTORES, 2021)



Bruna Cristina Beltrão Silva Beilegoli,
Marcelo Franco Porto,
Flaviane Beltrão Silva,
Matheus Guimarães Novais



Figura 4 – Exemplo de veículo utilizado para coleta de dados de pavimento (STRATA ENGENHARIA, 2021)

Os dados pré-processados, foram modelados e inseridos em um banco de dados relacional. O sistema gerenciador de banco de dados utilizado foi o *PostgreSQL*, por ser um projeto de código aberto (*Open Source*). Principalmente para o meio governamental, faz-se vantajosa essa escolha, por ser uma alternativa de menor custo. Hoje, o *PostgreSQL* é tido como um dos mais avançados na sua categoria, contando com recursos como integridade transacional, controle de concorrência multiversão, *triggers* (gatilhos) e estrutura para guardar e tratar dados georreferenciados a partir da extensão espacial *PostGIS*.

2 - Modelagem e análise dos dados:

Pela fase anterior identificou-se os objetivos e requisitos do projeto, bem como os dados necessários para alimentar o modelo. Além disso, foram estabelecidos os protocolos para armazenamento e processamento dos dados, pois direcionam a modelagem.

A principal referência para a modelagem, foi o código denominado Sistema Rodoviário Estadual - SRE, que foi tratado como o “CPF” da rodovia, onde toda a informação está relacionada, incluindo registro de caráter histórico, dados geoespaciais, sobre a localização e extensão das rodovias ao longo do tempo, registros de atividades de manutenção realizadas, dados de contagem volumétrica e classificatória do tráfego.

A partir da agregação dos resultados por SRE, para análise dos dados e implementação da abordagem *Data-Driven*, foram utilizadas ferramentas de análise estatística, como *R* e *Python*, além de softwares de visualização de dados, como o *Power BI*. Assim, possibilitou-se as correlações previstas para cada levantamento com a validação do modelo computacional.

DOI: [10.29327/1430212.49-94](https://doi.org/10.29327/1430212.49-94)

GESTÃO DE ATIVOS RODOVIÁRIOS ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DATA-DRIVEN E BIM

3 - Avaliação dos resultados e recomendações para implementação prática:

Os resultados obtidos foram avaliados em relação aos objetivos do projeto, e foram propostas recomendações para implementação prática da abordagem *Data-Driven* na gestão de ativos rodoviários, destacando os benefícios e desafios associados.

RESULTADOS

A combinação eficiente de informações modeladas (*BIM*) e dados de campo, resultou em uma representação unificada e precisa dos ativos rodoviários e os dados coletados de diversas fontes integradas ao banco, proporcionaram uma visão abrangente e precisa dos ativos rodoviários.

A figura 5 apresenta a visão unificada e geoespacializada a partir de uma das telas do sistema e os KPI's de gestão do cadastro das obras de arte especiais do Estado de Minas Gerais.

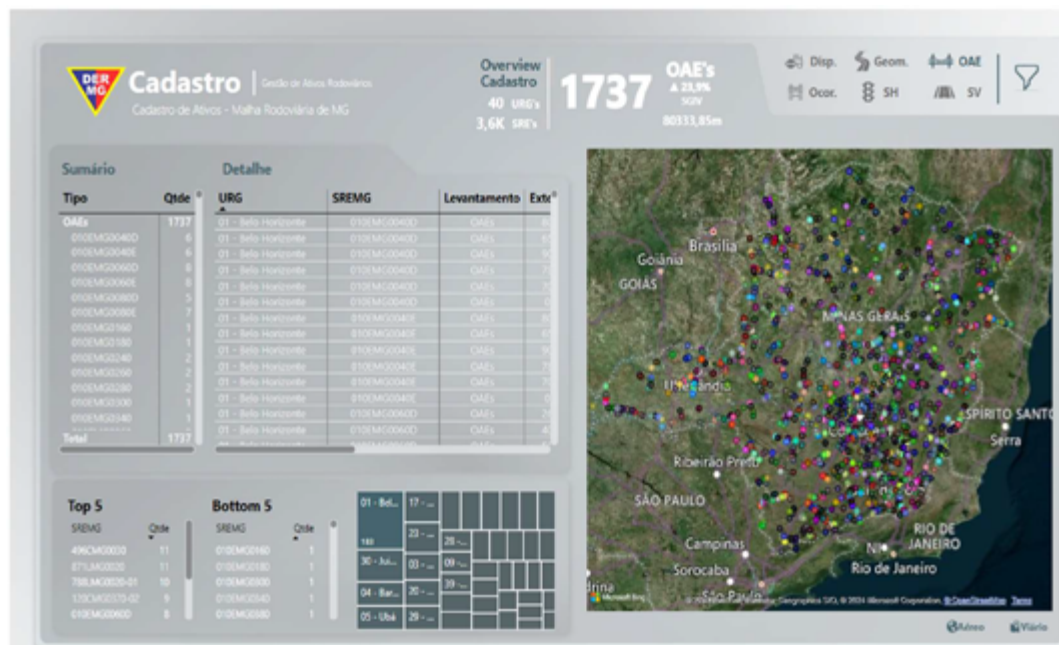


Figura 5 - Sistema, *Dashboard* e *KPI* - representação unificada das OAE's do DER-MG (OS AUTORES, 2024)

A integração do *BIM* com a abordagem *Data-Driven* oferece uma abordagem abrangente para a gestão de ativos rodoviários, onde os modelos *BIM* se tornam a base para a coleta e análise de dados. Isso não apenas facilita a compreensão da condição dos ativos rodoviários, mas também permite a implementação de estratégias voltadas para a preservação e extensão de sua vida útil, ao mesmo tempo em que otimiza os processos de gestão.



Bruna Cristina Beltrão Silva Beilegoli,
 Marcelo Franco Porto,
 Flaviane Beltrão Silva,
 Matheus Guimarães Novais

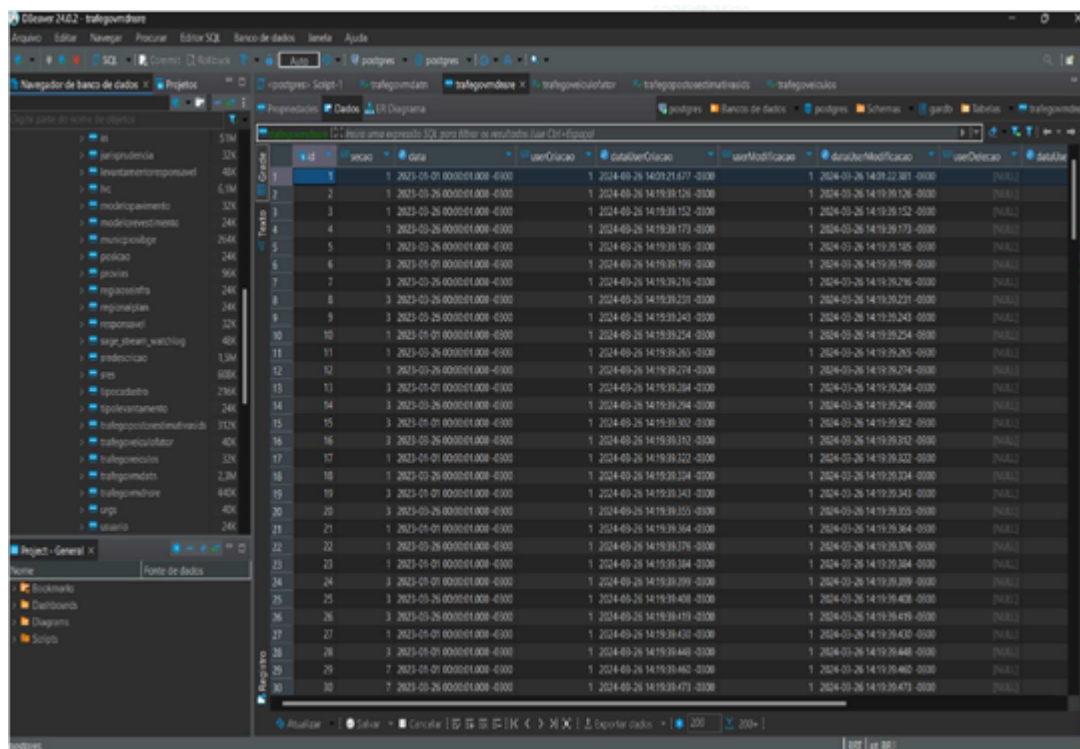


Figura 6 - Estruturação dos dados em Banco PostgreSQL, integração *Data-Driven* (OS AUTORES, 2023)

Status Report dos Ativos Rodoviários

Apresenta-se a seguir os principais números da campanha de cadastro geral das rodovias e reestruturação do sistema de gestão de pavimentos 2022/2023.

Tabela 1. Extensão da malha rodoviária DER-MG 2022/2023 (OS AUTORES, 2024)

TIPO RODOVIA	Extensão (km)	%
Pavimentada	22.601	80,3
Não Pavimentada	5.543	19,7
Total	28.144	100%

Tabela 2. Estado Geral das Rodovias Pavimentadas 2022/2023 (OS AUTORES, 2024)

IRI médio	4 REGULAR
ICPF	2,1 REGULAR
IGGE	35
IES	C REGULAR

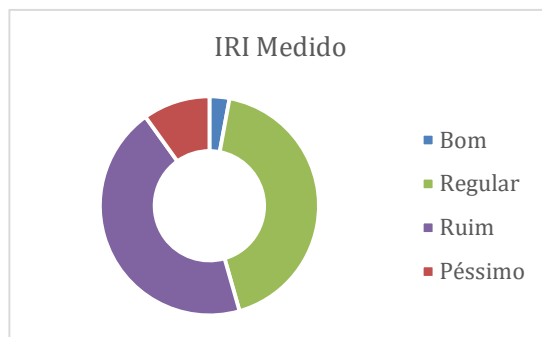


DOI: 10.29327/1430212.49-94

GESTÃO DE ATIVOS RODOVIÁRIOS ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DATA-DRIVEN E BIM

IRI Medido	(%) * Rodovias Pavimentadas
Bom	3%
Regular	43%
Ruim	45%
Péssimo	10%
Total Avaliado	100%

*Pavimentadas



IES – Índice do Estado da Superfície do Pavimento	(%) * Rodovias Pavimentadas
Bom	15%
Regular	48%
Ruim	30%
Péssimo	8%
Total Avaliado	100%

*Pavimentadas

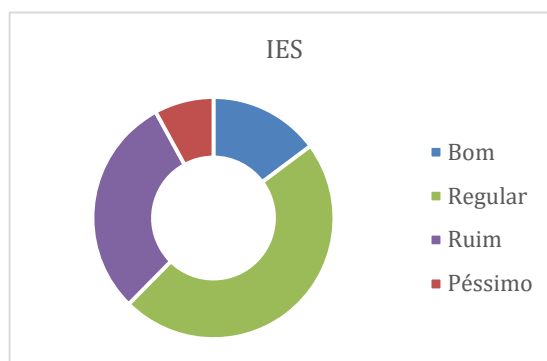


Figura 7 - Status Report Gestão de Ativos Rodoviários DER-MG – 2022/2023
(OS AUTORES, 2024)

Além disso, foram conduzidas simulações de cenários para avaliar o impacto de diferentes estratégias de gestão de ativos. Essas etapas foram essenciais para demonstrar como a integração de *BIM* e abordagem *Data-Driven* pode ser implementada na prática para melhorar a gestão de ativos rodoviários, proporcionando uma visão holística e baseada em dados do estado e desempenho das estradas e infraestruturas associadas.

CONCLUSÃO

Esse trabalho demonstrou como os dados relativos aos ativos rodoviários estão sendo modelados e manipulados na Gerência de Ativos Rodoviários do DER-MG, ao mesmo tempo em que apresentou a base dos padrões ISO 55.000, 55.001 e 55.002. Embora esses padrões sejam completos e bem construídos, a intenção foi fornecer uma visão geral concisa para pesquisadores que desejam conhecer este tópico.

A integração de dados de diferentes fontes, como de comportamento do tráfego, estado de condição do pavimento, histórico de intervenções vem possibilitando ao DER-MG ter um panorama das condições das rodovias e sua operação. Isso ajudará a garantir que as decisões de gestão sejam sustentáveis a longo prazo, e alinhadas às necessidades atuais e futuras.



Cabe informar que malha rodoviária do estado atualmente está recebendo intervenções do programa Provias, com obras de recuperação funcional, pavimentação e construção de pontes, e o cenário apresentado nesta pesquisa configura o recorte do diagnóstico dos anos 2022/23. Dito isto, ressalta que alguns trechos passaram por intervenções de melhorias do Provias, onde serão avaliados na próxima campanha.

Este modelo, focado especificamente na gestão de informações dos ativos rodoviários, traz inovação no processamento e análise de dados das rodovias estaduais do DER-MG. Por isto, pode contribuir com a gestão pública de forma clara e fornecer informações simplificadas aos tomadores de decisão. Como as pessoas, diferentes sistemas de software devem trabalhar juntos em processo colaborativo. Embora cada tecnologia possa ter um propósito ou benefício único, isso não é muito relevante se as informações não forem compartilhadas e integradas por meio de plataformas ou sistemas.

É importante continuar monitorando e avaliando o desempenho das estratégias implementadas, buscando constantemente oportunidades de melhoria e inovação.

Gerir os dados adequadamente tem impulsionado o uso de novos processos e tecnologias, incluindo processos de modelagem *BIM*, *machine learning* e inteligência artificial, entre outros, que desempenham um papel inovador no processo da gestão dos ativos rodoviários.

Apesar dos avanços na tecnologia, muitas organizações enfrentam desafios na gestão eficaz de suas infraestruturas rodoviárias. A falta de dados precisos e atualizados, a complexidade dos sistemas de infraestrutura e a necessidade de priorizar investimentos são apenas alguns dos problemas enfrentados pelos gestores de ativos rodoviários.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig).

ACKNOWLEDGMENT

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) and Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig).

REFERÊNCIAS

ABNT. ABNT NBR ISO 55000, Gestão de ativos - Visão geral, princípios e terminologia. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2014a.

ABNT. ABNT NBR ISO 55001, Gestão de ativos - Sistemas de gestão - Requisitos. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2014b.

ABNT. ABNT NBR ISO 9001, Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2015a.

ABNT. ABNT NBR ISO 19650-1, Organização da informação acerca de trabalhos da construção - Gestão da informação usando a modelagem da informação da construção - Parte 1: Conceitos e princípios.



DOI: [10.29327/1430212.49-94](https://doi.org/10.29327/1430212.49-94)

GESTÃO DE ATIVOS RODOVIÁRIOS ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO DATA-DRIVEN E BIM

ABNT. ABNT NBR ISO 19650-2, Organização da informação acerca de trabalhos da construção - Gestão da informação usando a modelagem da informação da construção - Parte 2: Fase de entrega de ativos.

ASIAN DEVELOPMENT BANK - Compendium of best practices in road asset management – 2018

AZEVEDO, C. AZEVEDO - Asset Management Insights: Phases, Practices, and Value – 2019

BERNDTSSON, M; FORSBERG, D.; Stein, D.; Svahn, T.; Becoming A Data-Driven Organisation
<https://www.researchgate.net/publication/328233575> - 2018

Compendium of best practices in road asset management – 2018 Asian Development Bank

CAMPOS, M. A. L.; MÁRQUEZ, A. C. A Maintenance Management Framework Based on PAS 55. In: Advanced Maintenance Modelling for Asset Management. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 17–41.

CÔRTEZ, J; Mizrahy, A; LAZOR, R; RESENDE, P; PEREIRA, R; - Modelagem BIM para desenvolvimento de gêmeo digital visando a segurança e manutenção de barragens em operação - xxxiv Seminário Nacional de Grandes Barragens – 2023

DA SILVA, R. F.; DE SOUZA, G. F. M. Mapping the Literature on Asset Management: A Bibliometric Analysis. Journal of Scientometric Research, v. 10, n. 1, p. 27–36, 8 maio 2021.

DIAZ-SARACHAGA, J. M; GARCÍA P, C.; GONZÁLEZ M, M.; Assessment of the governance dimension in the frame of the 2030 agenda: Evidence from 100 Spanish cities. Sustainability, v. 13, n. 10, p. 5519, 2021.
<https://doi.org/10.3390/su13105519>

EASTMAN, C. M.; Through the looking glass: why no wonderland. Computer applications to architecture in the USA. Computer-Aided Design, 6(3), 119-124. doi:10.1016/0010- 4485(74)90042-6 – 1974

FLEURY, P.F; WANKE, P; FIGUEIREDO, K.F; Logística empresarial: A Perspectiva Brasileira – São Paulo – Atlas – 2000

GANDHI, P.; BATHIA, S.; DEV, K. Data driven decision making using analytics. Boca Raton: CRC, 2021.

HAAS, R.; HUDSON, W. R. ZANIEWSKI, J.; Modern Pavement Management. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida/USA - 1994

HARTMANN, A., & DEWULF, G.; Contradictions in infrastructure management – The introduction of performance-based contracts at the Dutch highways and waterways agency. 2nd International Conference on Infrastructure Systems and Services: Developing 21st Century Infrastructure Networks, INFRA - 2009

KEADY, R. A. KEADY- Equipment Inventories for Owners and Facility Managers: Standards, Strategies and Best Practices - 2013

KHAN, U.A; CHEN Y; JIN R; SEIDU, R; DUC, H; Infrastructure Model Development to Enhance Resilience Against Future Changes Using InfraWorks & GIS – ICSCEA- 2023

KUMAR, U. D. Business analytics: The science of data-driven decision making. 2 nd. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021.



Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli,
Marcelo Franco Porto,
Flaviane Beltrão Silva,
Matheus Guimarães Novais

-
- MULLARKEY, M. HEVNE, A; An elaborated action design research process model - European Journal of Information Systems 2019, vol. 28, no. 1, 6–20
- NORDAL, H.; EL-THALJI, I. Modeling a predictive maintenance management architecture to meet industry 4.0 requirements: A case study. Systems Engineering, v. 24, n. 1, p. 34–50, 24 jan. 2021.
- OSICHENKO D, SPIELHOFER R; Future Challenges for the Road Asset Management <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2018.708> - 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure – CETRA 2018
- PAN, Y; ZHANG, L; Integrating BIM and AI for Smart Construction Management: Current Status and Future Directions - Archives of Computational Methods in Engineering (2023) 30:1081–1110
- PARK, S.; PARK, S. I.; LEE, S.-H. Strategy on sustainable infrastructure asset management: Focus on Korea's future policy directivity. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 62, p. 710–722, set. 2016
- R. A. KEADY; Equipment Inventories for Owners and Facility Managers: Standards, Strategies and Best Practices – 2013
- STRATA ENGENHARIA; <https://www.strata.com.br/> - dezembro 2021
- SENÇO, W.; Manual de técnicas de pavimentação. Volume 1. 1.ed. São Paulo: PINI - 2008
- UDDIN , W UDDIN , W. RONALD HUDSON , RALPH C.G. HAAS - Public Infrastructure Asset Management, Second Edition – 2013
- WU,C; WU, WU, P; . WU, WANG ,J.; WANG, JIANG , R;. JIANG, CHEN, M.; CHEN, WANG, X; WANG - Critical review of data-driven decision-making in bridge operation and maintenance - Structure and Infrastructure Engineering, 18:1, 47-70 - 2022



DEFEITOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: ESTUDO DE CASO EM ESTRADA QUE INTERLIGA OS MUNICÍPIOS DE MISSAL E ITAIPULÂNDIA - PR

Priscila Reis¹; Daniela Kunz²; Jaqueline Tomazini Orth³ & Atilio Lorini⁴

RESUMO

A camada de revestimento asfáltico desempenha um papel essencial na infraestrutura viária, sendo responsável por suportar o tráfego e distribuir as cargas de maneira controlada para as camadas inferiores do pavimento. Além disso, ela é responsável por proteger a estrutura do pavimento da umidade e garantir condições ideais de rolamento para os veículos. No entanto, um aumento substancial no fluxo de veículos, especialmente veículos pesados, como caminhões, pode causar um desgaste prematuro do pavimento. Deficiências no dimensionamento ou na execução também podem resultar no surgimento precoce de defeitos, comprometendo a sua funcionalidade e durabilidade. Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar os defeitos funcionais presentes em uma estrada municipal que liga os Municípios de Missal e Itaipulândia, localizados no oeste do Paraná. A estrada desempenha um papel crucial na região devido à sua importância para o escoamento da produção agrícola. No entanto, o intenso tráfego de veículos, principalmente de transporte de carga, tem sobrecarregado o pavimento, causando danos significativos devido à sua incapacidade de suportar as cargas pesadas. Para conduzir a análise, foi realizado estudo de caso e aplicada análise objetiva da superfície de pavimentos flexíveis, utilizando o método do índice de gravidade global (IGG) de acordo com a norma do DNIT 006/2003 – PRO, o qual classifica o estado do pavimento. Dessa forma, foi possível quantificar e classificar os diversos defeitos identificados ao longo do trecho analisado. O IGG resultante, de 121,64, classifica o pavimento do trecho estudado como ruim. Esses resultados enfatizam a urgência de implementar medidas preventivas e corretivas para proteger a infraestrutura viária diante do aumento do tráfego, especialmente veículos de grande porte, como os caminhões, que exercem uma carga significativa sobre o pavimento, contribuindo assim para seu desgaste acelerado.

PALAVRAS-CHAVE: Infra-estrutura viária; Pavimento; Desgaste; Patologia; Manutenção.

ABSTRACT

The asphalt coating layer plays an essential role in road infrastructure, being responsible for supporting traffic and distributing loads in a controlled manner to the lower pavement layers. Additionally, it protects the pavement structure from moisture and ensures optimal rolling conditions for vehicles. However, a substantial increase in vehicle flow, especially heavy vehicles such as trucks, can cause premature pavement wear. Deficiencies in design or execution can also result in early onset of defects, compromising functionality and durability. Therefore, this study aimed to assess pathologies present in a municipal road connecting the municipalities of Missal and Itaipulândia, located in western Paraná, Brazil. The road plays a crucial role in the region due to its importance for agricultural production drainage. However, intense vehicle traffic, especially freight transport, has overloaded the pavement, causing significant damage due to its inability to support heavy loads. To conduct the analysis, a case study was performed, and an objective analysis of flexible pavement surface was applied using the Global Severity Index (GSI) method according to DNIT 006/2003 – PRO standard, which classifies pavement condition. Thus, it was possible to quantify and classify the various defects identified along the analyzed stretch. The resulting GSI, 121.64, classifies the pavement of the studied section as poor. These results emphasize the urgency of implementing preventive and corrective measures to protect road infrastructure against increased traffic, especially large vehicles such as trucks, which exert significant load on the pavement, contributing to its accelerated wear.

KEY WORDS: Road infrastructure; Pavement; Wear; Pathology; Maintenance.

¹ União de Ensino Superior do Iguazu - UNIGUAÇU, e-mail: priiscilareis@hotmail.com; dani-kunz@hotmail.com; eng.jaquelineorth@gmail.com; atiliolorini18@gmail.com



INTRODUÇÃO

Os pavimentos asfálticos desempenham um papel importante na infraestrutura viária, proporcionando conectividade e mobilidade para comunidades e economias (SILVA e CARMO, 2023; BARROS FILHO *et al.*, 2021). No entanto, manifestações patológicas, tais como fissuras, deformações e desagregações, representam desafios significativos que comprometem a durabilidade dessas estruturas, bem como podem resultar em custos significativos para agências de transporte e para a sociedade em geral (NASCIMENTO *et al.*, 2021).

O crescimento do tráfego de veículos nas últimas décadas tem sido um fenômeno marcante em muitas áreas urbanas e suburbanas ao redor do mundo. Esse aumento, impulsionado pelo crescimento populacional, expansão econômica e mudanças nos padrões de mobilidade, tem gerado uma pressão sem precedentes sobre a infraestrutura viária existente (COIMBRA, RIBEIRO e COUY, 2023). Diante disso, é comum observar um aumento correspondente nas manifestações patológicas em pavimentos asfálticos, o que representa um desafio significativo para a segurança e eficiência do transporte (WANG *et al.*, 2017).

Segundo Rosa *et al.* (2016), as patologias em pavimentos asfálticos se apresentam em uma variedade de formas e manifestações, influenciadas por uma série de fatores como tráfego, condições climáticas, qualidade dos materiais e técnicas de construção. Entre os principais tipos de patologias encontradas, destacam-se os defeitos de superfície, que incluem fissuras, trincas, buracos e ondulações, comprometendo a regularidade e segurança da via. As trincas e fissuras, por exemplo, podem surgir devido à contração térmica do asfalto, movimentações do solo, ou mesmo falhas na camada de base. Já os afundamentos e ondulações são frequentemente associados a problemas de compactação do solo ou à presença de materiais de baixa qualidade na base do pavimento. Além disso, as degradações superficiais, como desgaste, desagregação e exsudação do asfalto, afetam a durabilidade e estabilidade do pavimento, bem como, as deformações, como afundamentos, bombeamentos e ondulações, podem resultar em irregularidades na superfície do pavimento, prejudicando a drenagem e a capacidade estrutural da via (BARROS FILHO *et al.*, 2021).

De acordo com Silva e Oliveira (2021), esses fatores acarretam uma série de consequências que afetam tanto a infraestrutura viária quanto os usuários das vias. Em termos estruturais, essas patologias podem comprometer a capacidade de suporte do pavimento, levando a danos mais severos e custos mais elevados de manutenção e reparo. Além disso, as irregularidades na superfície do pavimento aumentam o risco de acidentes de trânsito, especialmente em condições climáticas adversas. A deterioração do pavimento também pode afetar negativamente o conforto dos usuários, causando vibrações e impactos excessivos nos veículos, além de contribuir para o aumento do consumo de combustível e emissões de poluentes (NASCIMENTO *et al.*, 2021).

Compreender as causas subjacentes a essas manifestações patológicas é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção e manutenção. Diante disso, o estudo das manifestações patológicas em pavimentos asfálticos torna-se, de grande relevância, visto que tais problemas não apenas comprometem a integridade estrutural dos pavimentos, mas também podem resultar em consequências diretas para a segurança dos usuários das vias, custos de manutenção e operação, e até mesmo impactos ambientais, comprometendo sua vida útil (SILVA, 2022). Segundo Souza, Pires e Marques (2021), a gerência eficaz de pavimentos é essencial para garantir a segurança e a durabilidade das estradas. Isso envolve a implementação de métodos adequados de levantamento de patologias, que permitem identificar e avaliar o estado do pavimento de forma precisa e abrangente. Esses métodos incluem inspeções visuais regulares, análises de superfície



DOI: [10.29327/1430212.49-96](https://doi.org/10.29327/1430212.49-96)

DEFEITOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS:

ESTUDO DE CASO EM ESTRADA QUE INTERLIGA OS MUNICÍPIOS DE MISSAL E ITAIPULÂNDIA - PR

utilizando tecnologias avançadas como laser e radar, e a aplicação de índices de avaliação de condição, como o Índice de Gravidade Global (IGG). Além disso, a gerência de pavimentos abrange o planejamento e a execução de medidas de manutenção preventiva e corretiva, visando mitigar os efeitos do desgaste e prolongar a vida útil da infraestrutura viária. Uma gerência eficiente não apenas melhora a qualidade das estradas, mas também contribui para a economia de recursos e para a segurança dos usuários das vias (GABRIEL e VERDADE, 2021).

Nesse contexto, este trabalho investigou as manifestações patológicas em um trecho da Linha São João, uma das principais vias de acesso entre os municípios de Itaipulândia e Missal, no estado do Paraná, utilizando o índice de gravidade global do pavimento (IGG).

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste estudo, adotou-se o método qualitativo de pesquisa de estudo de caso com abordagem metodológica abrangente. Foi realizada uma investigação de campo para examinar as manifestações patológicas no pavimento asfáltico de um trecho na estrada municipal que liga os municípios de Missal e Itaipulândia, utilizando uma combinação de levantamento fotográfico e análise do Índice de Gravidade Global (IGG), conforme ilustrado na Figura 01.



Figura 01: Fluxograma de etapas de pesquisa (AUTORES, 2024).

Análise do Índice de Gravidade Global (IGG)

O Índice de Gravidade Global (IGG) é uma análise superficial do pavimento, bem como uma métrica amplamente utilizada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2003) para avaliar a condição do pavimento em rodovias e vias urbanas. Este índice fornece uma medida quantitativa da gravidade das manifestações patológicas presentes nos pavimentos, permitindo uma avaliação objetiva da sua deterioração. Para determinação do IGG é utilizada a seguinte fórmula:



$$IGG = \sum IGI \quad (1)$$

Em que:

IGI é o Índice de Gravidade Individual, calculado pela fórmula:

$$IGI = fr \times fp \quad (2)$$

Em que:

fr – frequência relativa, determinada pela fórmula:

$$fr = \frac{fa \times 100}{n} \quad (3)$$

Em que:

fa – frequência absoluta, corresponde ao número de vezes em que a ocorrência foi verificada;

n – número de estações levantadas;

fp – valor de ponderação, obtido de acordo com a Figura 02;

Tabela 01: Valor do fator de ponderação (DNIT, 2003).

Ocorrência Tipo	Codificação de ocorrências de acordo com a Norma DNIT 005/2002-TER "Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia" (ver item 6.4 e Anexo D)	Fator de Ponderação fp
1	Fissuras e Trincas Isoladas (FI, TTC, TTL, TLC, TLL e TRR)	0,2
2	FC-2 (J e TB)	0,5
3	FC-3 (JE e TBE) NOTA: Para efeito de ponderação quando em uma mesma estação forem constatadas ocorrências tipos 1, 2 e 3, só considerar as do tipo 3 para o cálculo da frequência relativa em percentagem (fr) e Índice de Gravidade Individual (IGI); do mesmo modo, quando forem verificadas ocorrências tipos 1 e 2 em uma mesma estação, só considerar as do tipo 2.	0,8
4	ALP, ATP e ALC, ATC	0,9
5	O, P, E	1,0
6	EX	0,5
7	D	0,3
8	R	0,6

Após análise dos cálculos realizados, o conceito de degradação do pavimento em função do IGG, foi determinado de acordo com a Figura 03.

Tabela 02: Conceitos de degradação do pavimento em função do IGG (DNIT, 2003).

Conceitos	Limites
Ótimo	$0 < IGG \leq 20$
Bom	$20 < IGG \leq 40$
Regular	$40 < IGG \leq 80$
Ruim	$80 < IGG \leq 160$
Péssimo	$IGG > 160$



DOI: 10.29327/1430212.49-96

DEFEITOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS:

ESTUDO DE CASO EM ESTRADA QUE INTERLIGA OS MUNICÍPIOS DE MISSAL E ITAIPULÂNDIA - PR

O trecho em análise possui uma extensão de 2,2 km, e foi dividido em estacas de 20 metros para a avaliação do IGG, totalizando 110 estacas para coleta de dados. Essa segmentação seguiu as diretrizes da Norma 006 - PRO (DNIT 2003), que recomenda considerar uma faixa de 3 metros à frente e 3 metros atrás de cada estaca, como ilustrado na Figura 02, além disso a referida norma recomenda utilizar trechos homogêneos durante a avaliação, ou seja, utilizar segmentos de uma via ou rodovia que apresentam condições semelhantes de pavimento.

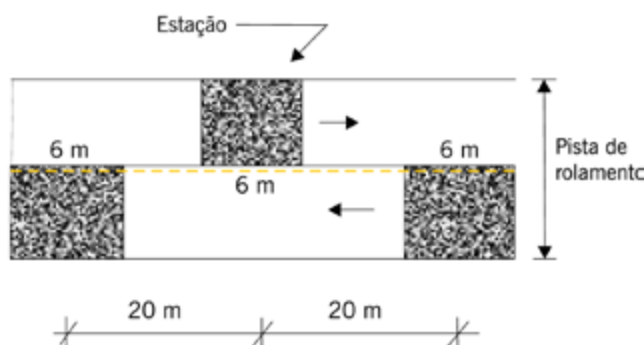


Figura 02: Exemplo de demarcação de áreas para inventário de defeitos (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Considerando que se trata de uma pista simples, ambos os lados foram analisados, pois os dois sentidos são igualmente solicitados. Os trechos foram percorridos a pé, registrando e contabilizando as patologias encontradas em cada estaca.

Local de Estudo

O trecho selecionado para o levantamento dos defeitos funcionais está situado na região Oeste do Paraná, entre os municípios de Missal e Itaipulândia (conforme ilustrado na Figura 03).

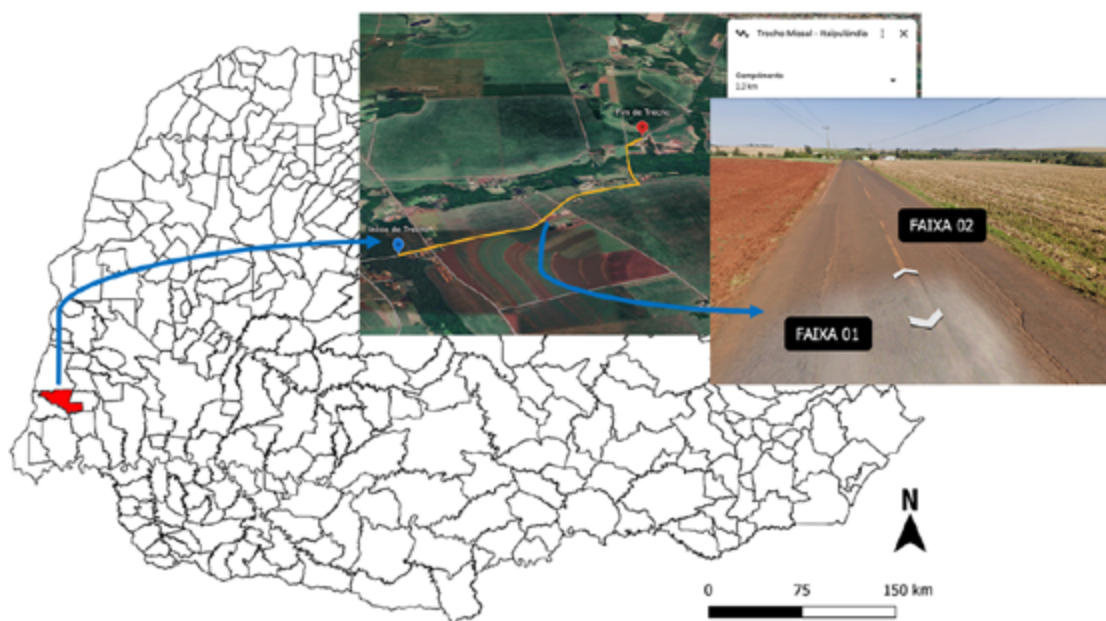


Figura 03: Local de estudo (IBGE, 2023, adaptado por AUTORES, 2024).



Com uma população de aproximadamente 11.064 habitantes em Missal e 11.485 em Itaipulândia (dados do IBGE, 2023), esta via é um elo essencial para os moradores que se deslocam diariamente entre essas localidades. Além disso, muitos residentes dependem dessa estrada para se deslocar ao trabalho, enquanto caminhões que transportam produtos agrícolas a utilizam como via principal para o escoamento de cargas.

A região que abrange os dois municípios possui verões quentes e chuvosos, com uma temperatura média superior a 34°C. Durante o inverno, as geadas são pouco frequentes, e a temperatura média fica abaixo de 18°C, podendo atingir até 31°C. O índice pluviométrico médio anual é de 1788 milímetros. Quanto ao relevo, em média, 70% da área é composta por regiões planas ou suavemente onduladas, enquanto os restantes 30% são ocupados por regiões pedregosas de declividade acentuada (IBGE, 2023).

RESULTADOS

Após a segmentação do trecho de 2,2 km em estacas de 20 metros, procedeu-se à inspeção e catalogação dos defeitos funcionais. Esta etapa envolveu observação minuciosa, sendo que a identificação dos defeitos foi realizada por meio da comparação com imagens e descrições correspondentes disponíveis na norma DNIT 005/2003 – TER (Figura 04).

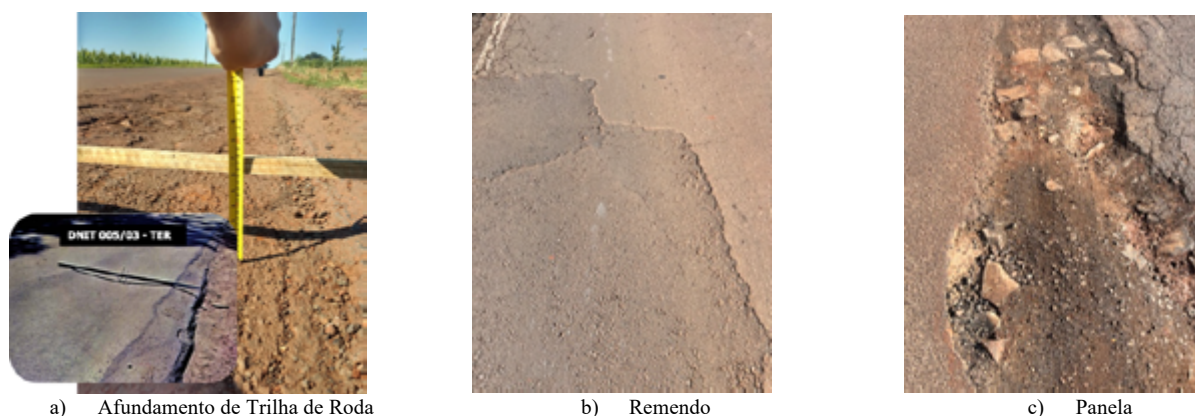


Figura 04: Defeitos funcionais (AUTORES, 2024).

A Figura 05 (a, b, c) apresenta algumas das painelas encontradas no trecho analisado, causadas pela existência de trinca de jacaré, onde teve-se a infiltração de precipitação somado ao intenso tráfego de veículos pesados e assim formando os buracos apresentados. Este tipo de defeito é causado por alguns fatores como: variações climáticas, infiltração de água, tráfego pesado, baixa qualidade do material utilizado e falta de manutenção adequada (MACHADO, 2013). Segundo Oliveira *et al.* (2017) a água penetra nas fissuras aumentando as rachaduras, além disso o tráfego pesado agrava as deformações, enquanto a baixa qualidade dos materiais e a construção inadequada aceleram a deterioração.

As trincas de jacaré, conhecidas popularmente como “couro de jacaré” apareceram com bastante frequências, essas são causadas principalmente pela fadiga do asfalto devido ao tráfego pesado repetitivo (SILVA, 2008). Elas ocorrem quando a base ou sub-base do pavimento falha, não conseguindo suportar as cargas aplicadas, levando a rachaduras interligadas que formam um padrão semelhante à pele de um jacaré. Além disso, segundo este mesmo autor, a infiltração de água e a má



DOI: 10.29327/1430212.49-96

DEFEITOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS:

ESTUDO DE CASO EM ESTRADA QUE INTERLIGA OS MUNICÍPIOS DE MISSAL E ITAIPULÂNDIA - PR

drenagem agravam esse problema, acelerando a deterioração do pavimento, bem como a baixa qualidade dos materiais e a construção inadequada também contribuem para a formação dessas trincas (Figura 05 (d, e, f)). Dessa maneira, a ausência de uma base adequada e a constante passagem de veículos pesados corroboraram para a frequência elevada desse tipo de defeito.

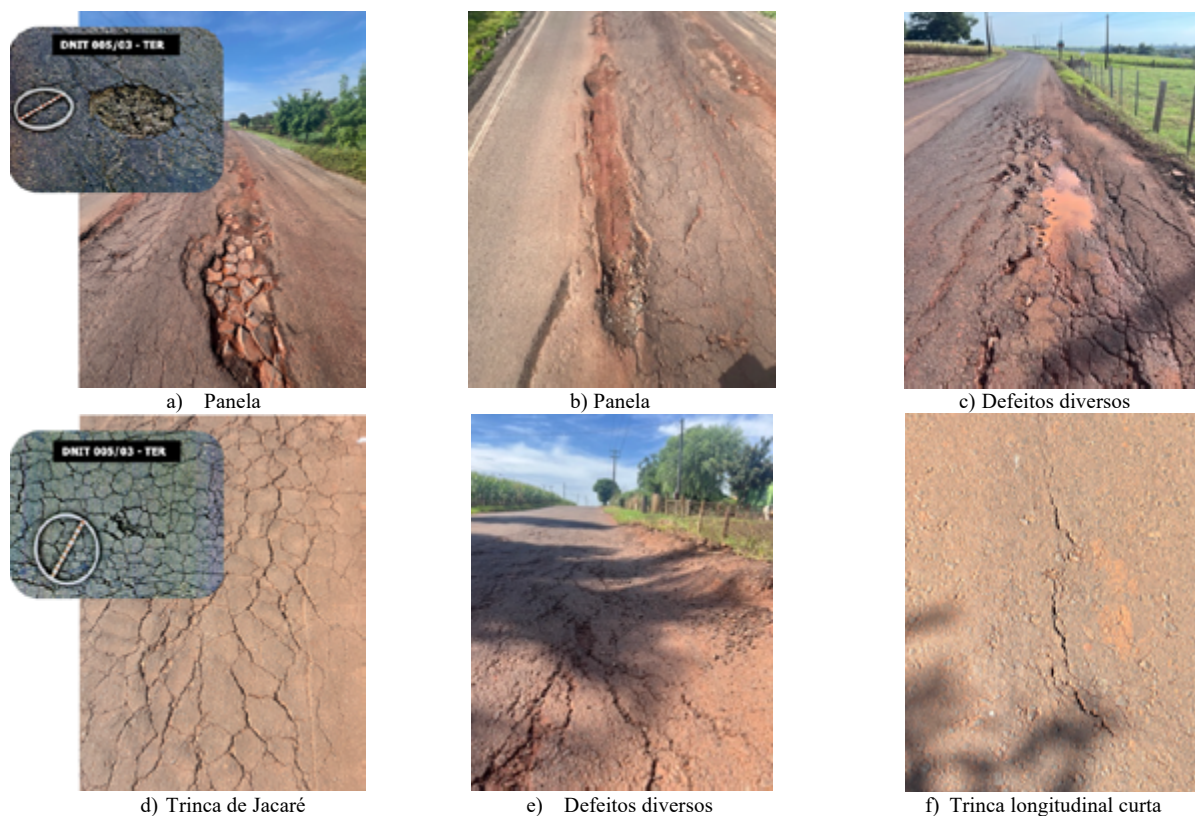


Figura 05: Defeitos funcionais (AUTORES, 2024).

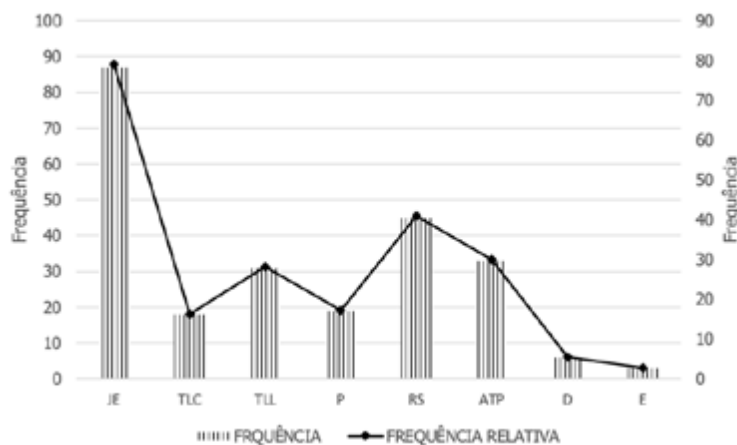
Após o cálculo do Índice de Gravidade Global, observou-se que o resultado obtido se encontra dentro do intervalo de $80 < IGG \leq 160$, classificando o pavimento como ruim, sendo que o cálculo de IGG e os fatores de ponderação utilizados estão apresentados na Tabela 03. Destaca-se ainda que o valor obtido, de 121,64, está muito próximo do limite que classifica o pavimento como péssimo. Essa situação pode ser considerada crítica, especialmente considerando que o trecho analisado é frequentemente utilizado pelos moradores e serve como rota para veículos pesados.

Tabela 03: Cálculo do Índice de Gravidade Global do Pavimento (AUTORES, 2024).

PATOLOGIA	FREQUÊNCIA	TOTAL DE ESTACAS	FREQUÊNCIA RELATIVA	FATOR DE PONDERAÇÃO	IGI	IGG
TRINCA DE JACARÉ	87	110	79,09	0,50	39,55	121,64
TRINCA LONGITUDINAL CURTA	18	110	16,36	0,20	3,27	
TRINCA LONGITUDINAL LONGA	31	110	28,18	0,20	5,64	
PANELA	19	110	17,27	1,00	17,27	
REMENDO	45	110	40,91	0,60	24,55	
AFUNDAMENTO	33	110	30,00	0,90	27,00	
DESGASTE	6	110	5,45	0,30	1,64	
ESCORREGAMENTO	3	110	2,73	1,00	2,73	



Verificou-se que determinados defeitos ocorreram com maior frequência, como trincas de jacaré, remendos e afundamentos de trilhas de roda. Para uma representação visual mais clara dessas ocorrências, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 06, no qual são exibidos todos os defeitos que ocorreram pelo menos uma vez.



Legenda:

JE – Trinca por fadiga (couro de jacaré)

TLC – Trinca Longitudinal Curta

TLL – Trinca Longitudinal Longa

P - Panela

RS – Remendo Superficial

ATP – Afundamento de Trilha de Roda Plástico

D - Desgaste

E - Escorregamento

Figura 06: Manifestações Patológicas (AUTORES, 2024)

O defeito que apareceu como segundo mais frequente foi o remendo superficial, que apesar de ser uma atividade de conservação, também é considerado um defeito por apontar um local de fragilidade, bem como impactar o conforto no rolamento. Na maioria dos casos, os remendos foram executados como forma de recomposição de painéis ou com o objetivo de corrigir deformações plásticas. As principais causas são a carga de tráfego, emprego de material de má qualidade, ação do meio ambiente e má construção (DNIT, 2003). Dados fornecidos pela Prefeitura do Município de Missal revelam que várias manutenções foram realizadas ao longo dos anos desde a execução do revestimento asfáltico em CBUQ em 2013, o que justifica a presença significativa de remendos no pavimento.

As trincas longitudinais curtas e longas também foram observadas com frequência nos trechos analisados. As curtas ocorreram devido as variações térmicas, bem como devido ao envelhecimento e a oxidação do pavimento, onde a superfície se torna mais rígida. Já as longas surgiram devido a problemas estruturais no pavimento, como falha na base ou sub-base, além disso o tráfego pesado e repetitivo potencializa essas trincas, assim como a expansão e contração da camada de revestimento devido as variações de temperatura. Este tipo de defeito também foi observado nas junções entre as faixas de tráfego e entre a faixa de rodagem, áreas onde a densidade de material é menor e os vazios são mais pronunciados.

Afundamentos de trilha de roda, desgaste e escorregamento também foram encontrados ao decorrer do trecho. As causas dos afundamentos de trilha ocorreram devido ao grande tráfego de caminhões com cargas elevadas, onde o pavimento não foi desenvolvido para tal tráfego, bem como a utilização de materiais inadequados. O desgaste dos pavimentos não foi observado com frequência, contudo gera problemas de segurança e conforto ao usuário, e é causado principalmente por fatores como tráfego intenso, condições ambientais adversas, qualidade inadequada dos materiais e



DOI: 10.29327/1430212.49-96

DEFEITOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS:
ESTUDO DE CASO EM ESTRADA QUE INTERLIGA OS MUNICÍPIOS DE MISSAL E ITAIPULÂNDIA - PR

deficiências na construção. Já o escorregamento é causado principalmente por problemas de ligação entre as camadas do pavimento, decorrentes de aplicação inadequada de ligante e problemas de compactação.

A ocorrência dos defeitos foi observada em todo o trecho percorrido, onde constatou-se que apenas sete das cento e dez estacas inspecionadas não exibiam qualquer tipo de manifestação patológica, sendo elas identificadas como 8, 9, 10, 43, 57, 95 e 96, conforme indicado na Figura 07. Essa observação sugere uma uniformidade nas ocorrências de defeitos ao longo do trecho investigado, uma vez que a maioria das estacas apresenta algum tipo de falha estrutural ou irregularidade do mesmo tipo.

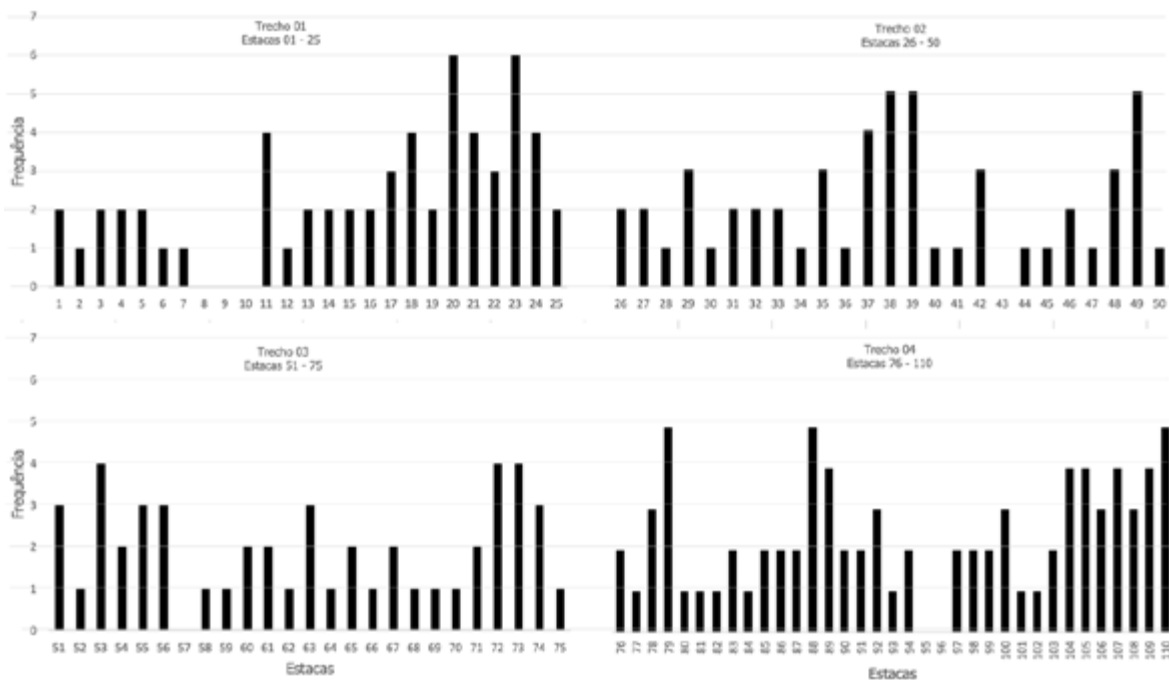


Figura 07: Frequência de manifestações patológicas por estaca (AUTORES, 2024).

Ao decorrer do levantamento de dados, observou-se um considerável fluxo de veículos pesados no trecho sob análise (ver Figura 08). Diante dessa constatação, com o objetivo de avaliar com mais precisão o volume de tráfego diário na rota de pesquisa, buscou-se informações junto à Prefeitura Municipal de Missal-PR, onde foi identificado um estudo datado de 2021, que incluiu uma contagem volumétrica, considerando uma taxa de crescimento do tráfego de 2% ao ano. Os dados obtidos estão detalhados na Tabela 04.

Tabela 04: Trafego médio diário anual (Prefeitura Municipal de Missal – PR)

ANO	Moto	Veículo	Ônibus			Caminhão			Carreta					TMDA
			2 eixos	3 eixos	4 eixos	2 eixos	3 eixos	4 eixos	3 eixos	4 eixos	5 eixos	6 eixos	7 eixos	
2021	417	2896	147	6	1	300	307	3	6	6	100	43	48	4280
2023	433	3013	153	7	1	312	317	3	6	5	103	45	49	4447



Essa análise proporciona um contexto essencial para compreender o ambiente operacional do trecho em estudo, influenciando diretamente na interpretação dos resultados obtidos durante a pesquisa. Outro aspecto crucial deste estudo foi o cálculo do número N para o dimensionamento do pavimento, considerando um período de projeto de 10 anos e utilizando o método da Resiliência, estabelecido pelo método da Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte (AASHTO), resultando em um valor de $5,05E+07$. De acordo com o método de projeto de pavimentos flexíveis estabelecido pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), esse valor indicaria a necessidade de uma camada de revestimento de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) com uma espessura de 10 cm.

É fundamental ressaltar que, inicialmente, a construção dessa estrada adotou a pavimentação poliédrica, um tipo de revestimento amplamente utilizado na região (ver Figura 08). No entanto, esse tipo de pavimentação não fornece a base adequada para esse tipo de revestimento, uma vez que não há a devida compactação do subleito para alcançar os números de CBR (California Bearing Ratio) adequados. Em 2013, foi aplicada uma camada de 3,5 cm de CBUQ FAIXA C, e desde então, várias manutenções têm sido necessárias nesta via, pois os defeitos funcionais surgem em um curto período de tempo. Uma das razões para isso pode ser a falta de uma base adequada, além do intenso tráfego de veículos pesados.



Figura 08: Condições do pavimento avaliado (AUTORES, 2024).

Diante desse contexto, a presença de diversas manifestações patológicas e a classificação do pavimento como ruim são justificadas. Isso se deve não apenas ao intenso tráfego de veículos pesados, que exercem uma pressão considerável sobre a superfície do pavimento, aumentando a probabilidade de surgimento de defeitos, mas também à inadequação da base. Assim, a alta demanda de tráfego não representa apenas um desafio para a durabilidade do pavimento, mas também uma das principais causas de sua deterioração prematura. Além disso a região do local onde foram realizados os levantamentos apresenta diversas variações climáticas, bem como nos últimos anos as temperaturas estão cada vez mais irregulares, contribuindo para o surgimento de



DOI: [10.29327/1430212.49-96](https://doi.org/10.29327/1430212.49-96)

DEFEITOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS:

ESTUDO DE CASO EM ESTRADA QUE INTERLIGA OS MUNICÍPIOS DE MISSAL E ITAIPULÂNDIA - PR

defeitos que surgem ou são potencializados com as variações climáticas. Essa relação entre o clima, volume de tráfego e a degradação do pavimento destaca a importância de estratégias eficazes de projeto, construção e manutenção para garantir a durabilidade e a segurança das vias.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que, considerando a classificação do pavimento como ruim, conforme indicado pelo Índice de Gravidade Global (IGG), aliado à constatação de deficiências na base e na espessura do revestimento de 3,5 cm, torna-se imprescindível propor melhorias para restaurar sua qualidade e prolongar sua vida útil.

Uma das principais recomendações é a verificação real espessura da camada de revestimento que deveria constar no local analisado, bem como investigar a necessidade de retirar o pavimento poliédrico existente e realizar a implementação de um reforço estrutural adequado, utilizando materiais de alta qualidade e seguindo as especificações técnicas recomendadas. Isso contribuirá para distribuir as cargas impostas pelo tráfego, minimizando a ocorrência de fissuras e deformações no pavimento.

Além disso, a implementação de um programa de manutenção preventiva regular, incluindo ações como a reparação de fissuras, o recapeamento de áreas danificadas e a aplicação de selantes para proteger o pavimento contra a infiltração de água e o desgaste prematuro, é crucial. Investir em monitoramento contínuo da condição do pavimento e promover a conscientização sobre a importância da preservação e manutenção adequada do pavimento são medidas fundamentais, tanto por parte dos órgãos responsáveis quanto dos usuários da via. A colaboração entre todas as partes interessadas é essencial para assegurar que o trecho seja mantido em boas condições ao longo do tempo, beneficiando a comunidade e promovendo a mobilidade segura e eficiente.

REFERÊNCIAS

BARROS FILHO, A. H. Q.; *et al.* Patologias encontradas na rodovia de pavimento flexível BR-101 sul km 80 a 82 no município de Joãoatã dos Quararapes-PE e adjacências: Uma análise crítica. **Acta Scientista**. Cabedelo, PE, v 2, n 2, 2021. Disponível em: <https://periodicos.iesp.edu.br/index.php/actascientia/article/view/397>. Acesso em: 02 abr. 2024.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros** / Liedí Bariani Bernucci... [et al.]. – Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2a edição, 2022. 750 p.: il. ISBN: 978-85-69658-02-3. Disponível em: <https://triumfotransbrasiliana.com.br/wp-content/uploads/2022/07/PA-Completo-2022.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2024.

COIMBRA, E. C., RIBEIRO, L. F. E. ., e COUY, M. L. S. Análise de patologias na pavimentação do perímetro urbano da BR – 116 em Teófilo Otoni. **Revista Multidisciplinar Do Nordeste Mineiro**, 5(1), 2023. Disponível em: <https://revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/1309>. Acesso em: 12 mar. 2024.

DNIT – Departamento de Infraestrutura de Transporte. **DNIT 005 – TER**. Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos - Terminologia, Rio de Janeiro – RJ, DNIT, 2003, 12 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit_005_2003_ter-1.pdf. Acesso em: 01 mar. 2024.

DNIT – Departamento de Infraestrutura de Transporte. **DNIT 006 – PRO**. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento, Rio de Janeiro – RJ, DNIT, 2003, 10 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/dnit006_2003_pro.pdf. Acesso em: 01 mar. 2024.



GABRIEL, C. G.; VERDADE, L. L. Avaliação dos defeitos de pavimento flexível através do método do índice de gravidade global (IGG) em Apucarana-PR. **Engenharia e Tecnologia**, v. 13, n. 04, p. 18-28, ISSN 2176-7270, Dez. 2021. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/18491/209209216025>. Acesso em: 02 abr. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama das Cidades**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/missal/panorama>. Acesso em: 20 abr. 2024.

MACHADO, D. M. C. Avaliação de normas de identificação de defeitos para fins de gerência de pavimentos flexíveis. São Paulo, 2013. 130 f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes e área de concentração em Infraestrutura de transporte – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-07112013-092252/publico/Denise.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2024.

NASCIMENTO, B. P. S., NEVES, G. A., RIBEIRO, G. A., SOUZA, L. B. G., CORREIA, L.S. Viabilidade e Benefícios na Implementação da Pavimentação de Concreto nas Cidades Brasileiras. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 7., Goiânia. **Anais [...]**. 2021. Disponível em: <https://www.confeca.org.br/midias/uploads-imce/Contecc2021/Civil/VIABILIDADE%20E%20BENEF%20C%20DCIOS%20NA%20IMPLEMENTA%20C%20%83O%20DA%20PAVIMENTA%20C%20%83O%20DE%20CONCRETO%20NAS%20CIDADES%20BRASIL%20EIRAS.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2024.

OLIVEIRA, J. P.; PEDROTTI, T. F.; DESSUY, T. Y.; ECHEVERRIA, J. A. S.; WAYHS, C. A. S. P. Estudo da influência da umidade excessiva e possíveis soluções em pavimentos flexíveis. Ijuí, Rio Grande do Sul, 2017. In: CRICTE – XXVIII Congresso regional de iniciação científica e tecnológica em engenharia, Anais. Ijuí: UNIJUÍ – Universidade Regional. Disponível em: <https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/cricte/article/view/8941/7646>. Acesso em: 02 jun. 2024.

ROSA, K. K. B.; MOTA, G. L. P.; SOUZA, J. M.; MARQUES, C. S.; NEVES, L. D.; FENANDES, F. A. S. Diagnóstico e procedimento de recuperação das Patologias apresentadas na pavimentação Asfáltica de Palmas-TO. **Revista integralização universitária**, Palmas, v.11, n.15, novembro 2016, p. 44- 58, novembro. 2016. Disponível em: <https://to.catolica.edu.br/revistas/index.php?journal=riui&page=article&op=view&path%5B%5D=64>. Acesso em: 02 mar. 2024.

SILVA, C. R. da. Manifestações Patológicas da AM 070. **Saberes da Engenharia: Uma contribuição para a sociedade** - Volume 2/ Organização: Suelânia Cristina Gonzaga de Figueiredo, Fabrício de Amorim Rodrigues, Luciane Farias Ribas. Belo Horizonte – MG: Editora Poisson, 2022. ISBN: 978-65-5866-203-7. Disponível em: DOI: 10.36229/978-65-5866-203-7. Acesso em: 15 mar. 2024.

SILVA, P. F. A. Manual de patologia e manutenção de pavimentos. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008. 128 p.

SILVA, A. O. dos S., e CARMO, J. C. dos S. Estudo da pavimentação de rodovias. **Paramétrica**, 15(2), 2023. Disponível em: <https://periodicos.famig.edu.br/index.php/parametrica/article/view/437>. Acesso em: 22 mar. 2024.

SILVA, P. O. A.; OLIVEIRA, R. F. de. Patologias em Pavimentos Flexíveis. **Revista GeTec, gestão, tecnologia e ciência**, v 10, n 30, 2021, Monte Carmelo, MG. Disponível em: <https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/2456>. Acesso em: 18 mar. 2024.

SOUZA, A. M. G. M. de; PIRES, G. de L. e; MARQUES, C. S. A. Sistema de gerência de pavimentos: levantamento da condição do pavimento flexível em trechos urbanos. 12º Fórum Científico

UNIFUNEC: Educação, Ciência e Tecnologia, 29 de setembro a 1º de outubro, Santa Fé do Sul (SP), v.12, n.12, **Anais [...]**, 2021. ISSN: 2318-745X. Disponível: <https://seer.unifunec.edu.br/index.php/forum/article/download/5416/4284>. Acesso em: 15 mar. 2024.

WANG, X.; *et al.* Shear fatigue between asphalt pavement layers and its application in design. **Construction And Building Materials**, [S. I.], v. 135, n. 01, p.297-305, 15 mar. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816320712>. Acesso em: 25 mar. 2024.



CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL DE PAVIMENTO FLEXÍVEL POR MEIO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE GLOBAL: ESTUDO DE CASO DA CE-513

Arlene de Oliveira¹; José Wémenson Rabelo Chaves²; Mariana de Araújo Leite³; Lucas Cavalcante de Almeida⁴ & Francisco Heber Lacerda de Oliveira⁵

RESUMO

O transporte rodoviário é o principal modo de transporte utilizado no Brasil e evolui em conjunto com o desenvolvimento do país. Com isso, é importante que as rodovias estejam adequadas para oferecer conforto e segurança aos usuários. Uma das formas de avaliar se determinada via está com as condições satisfatórias de rolamento é por meio do Índice de Gravidade Global - IGG. Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar a condição da superfície de um trecho de pavimento flexível de uma rodovia localizada no município de Quixadá-CE. Realizou-se um levantamento dos defeitos em 50 estações, obtendo-se um conceito ruim para toda a sua extensão. Esse resultado é devido à grande quantidade de defeitos, principalmente remendos, que foram encontrados em 66% das amostras. Além disso, foram verificadas panelas, fissuras, trincas longitudinais longas e curtas, trincas transversais longas e curtas, trincas do tipo couro de jacaré com e sem erosão, do tipo bloco com erosão, afundamentos plásticos e consolidados locais. Concluiu-se que a rodovia necessita de um reforço ou reconstrução, sendo necessária uma avaliação estrutural para complementar a sua análise completa.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento flexível; Método IGG; Defeitos.

ABSTRACT

Road transport is the main mode of transportation used in Brazil and is evolving in tandem with the country's development. As a result, it is important for roads to be suitable in order to offer comfort and safety to users. One of the ways of assessing whether a given road is in satisfactory condition is through the Global Severity Index (GSI). In view of the above, this study aims to characterize the surface condition of a stretch of flexible sidewalk on a highway located in the municipality of Quixadá-CE. A survey of defects was carried out at 50 stations, and a poor rating was obtained for the entire stretch. This result is due to the large number of defects, mainly patches, which were found in 66% of the samples. In addition, potholes, cracks, long and short longitudinal cracks, long and short transverse cracks, alligator skin cracks with and without erosion, block cracks with erosion, plastic sinkholes and local consolidations were found. It was concluded that the road needs to be reinforced or reconstructed, and that a structural assessment is needed to complement its complete analysis.

KEY WORDS: Paving. Method GSI. Defect. Analysis.

¹ Instituto Federal do Ceará - IFCE, Campus do Quixadá – CEP 63902-580 – Quixadá – CE, arlene.oliveira06@aluno.ifce.edu.br;

² Universidade Federal do Ceará - UFC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes - PETRAN / UFC, Campus de Fortaleza, Rua Prof. Armando Farias, 703 - Pici, Fortaleza - CE, CEP 60020-181, wemenson.chaves@det.ufc.br;

³ Centro Universitário de Quixadá - Unicatólica, Campus do Quixadá – Av. Plácido Castelo, S/N - Centro, Quixadá - CE, 63900-076, marianaleite@unicatolicaquixada.edu.br;

⁴ Instituto Federal do Ceará - IFCE, Campus do Quixadá – CEP 63902-580 – Quixadá – CE, lucas.almeida@ifce.edu.br;

⁵ Universidade Federal do Ceará - UFC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes - PETRAN / UFC, Campus de Fortaleza, Rua Prof. Armando Farias, 703 - Pici, Fortaleza - CE, CEP 60020-181, heber@det.ufc.br;



INTRODUÇÃO

De acordo com a CNT (2022), o Brasil possui 1.720.909 km de rodovias, sendo apenas 12,4% delas pavimentadas. 25,3% dessas rodovias apresentaram algum problema durante o levantamento da condição funcional, como, por exemplo, a falta de dispositivos de sinalização e a presença de defeitos funcionais. Com essa porcentagem reduzida de rodovias pavimentadas e a carência de manutenção e reabilitação (M&R) em tempo hábil, os usuários são afetados pela falta de conforto, segurança e aumento significativo do tempo de viagem (CNT, 2022).

Os pavimentos precisam ser monitorados de forma precedida por avaliação funcional e estrutural. Almeida *et al.* (2020) complementam que a avaliação de pavimentos é uma das etapas fundamentais para estabelecer quais intervenções são necessárias para melhorar o seu conforto e segurança. Diversas são os métodos empregados para avaliar as condições funcionais de um pavimento flexível, podendo ser utilizadas técnicas subjetivas e objetivas. As técnicas subjetivas estão relacionadas com a opinião dos profissionais responsáveis, logo o Levantamento Visual Contínuo (LVC) (SOUSA *et al.*, 2024). Por sua vez, as técnicas objetivas apresentam a condição da via de forma mais detalhada. Dentre os métodos comumente empregados no Brasil, tem-se o Índice de Gravidade Global (IGG).

Nesse contexto de avaliação funcional, observou-se que a rodovia CE-513, inserida no município de Quixadá/CE como rota importante de acesso a universidades e pontos turísticos, apresentou defeitos como panelas, remendos, fissuras, trincas e afundamentos plásticos. Desse modo, torna-se importante caracterizar as condições atuais dessa rodovia, devido à elevada quantidade de defeitos, que reduzem o conforto dos usuários e a trafegabilidade dos veículos. Além disso, busca-se contribuir cientificamente com dados para a cidade por meio da utilização do IGG para a avaliação do pavimento. Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar a condição da superfície de um trecho de pavimento asfáltico da CE-513 localizada no município de Quixadá-CE.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A avaliação de pavimentos, de acordo com Haas e Hudson (1978), é uma das principais etapas de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), pois é por meio dela que se pode verificar se o pavimento necessita manutenção, reconstrução, se foi bem construído e se está atendendo às especificações para as quais foi dimensionado em projeto. Silva (2006) complementa que essas avaliações visam estabelecer o nível de degradação da via, por meio da quantificação e identificação dos problemas superficiais, mantendo o pavimento em boas condições de rolamento e, conseqüentemente, garantindo a segurança e o conforto dos usuários.

Segundo Nakahara (2005), qualquer que seja o critério de avaliação escolhido, a finalidade de avaliação funcional é proporcionar parâmetros indicativos das necessidades de manutenção de uma rede rodoviária ou de uma via isoladamente. Devendo ser realizadas de forma contínua, uma vez que o surgimento de defeitos é algo constante, provocado pelo fluxo de tráfego e os fenômenos ambientais (FERNANDES JUNIOR, ODA e ZERBINI, 2006).

Os índices de serventia indicam a condição da superfície de um pavimento com base nos defeitos encontrados, atribuindo valores numéricos, a fim de chegar em um valor que represente a situação

DOI: [10.29327/1430212.49-91](https://doi.org/10.29327/1430212.49-91)
**CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL DE PAVIMENTO FLEXÍVEL POR MEIO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE GLOBAL:
ESTUDO DE CASO DA CE-513**

geral de serventia, possibilitando identificar a melhor técnica para a sua reabilitação (BERNUCCI *et al.*, 2022). De acordo com Zanchetta (2005), um dos indicadores mais empregado para isso, é o IGG, que permite classificar o estado geral de um determinado trecho de pavimento flexível, em função da incidência dos defeitos. Este índice pode ser útil nas tomadas de decisão acerca das intervenções e manutenções necessárias.

Conforme Mirandola (2016), as atividades de restauração e recapeamentos são os tipos de manutenção mais empregados em vias urbanas municipais, projetadas e executadas na maioria das vezes por meio de experiência empírica. Entretanto, para esses procedimentos analíticos é necessário adotar critérios de engenharia, ou seja, requer a execução de um projeto completo e consistente. Sendo assim, após determinar causas e defeitos, é fundamental fazer uma listagem de possíveis soluções, identificando as principais medidas a serem tomadas.

Conforme o DNIT (2003), o IGG é um índice numérico que retrata o grau de degradação funcional do pavimento, ou seja, o classifica o estado de serventia da superfície estudada. Para isso, é atribuído um valor numérico que varia de 0 (ótimo) a um valor numérico que quanto mais elevado, pior é a condição do pavimento, conforme a Tabela 1 (DNIT, 2003). Os conceitos expostos na Tabela 1, de acordo com Santos, Oliveira e Viana (2017), podem auxiliar nas tomadas de decisão acerca das atividades de manutenção e reabilitação necessárias.

Tabela 1. Condição do pavimento em função do IGG (DNIT, 2003).

Conceito	Limites
Ótimo	$0 < \text{IGG} \leq 20$
Bom	$20 < \text{IGG} \leq 40$
Regular	$40 < \text{IGG} \leq 80$
Ruim	$80 < \text{IGG} \leq 160$
Péssimo	$\text{IGG} > 160$

O IGG não é determinado para toda a pista, mas sim, feito por amostragem. Em caso de pista simples, as estações são inventariadas a cada 20 m, alternando-se a faixa a cada avaliação. No caso de pista dupla a cada 20 m, na faixa mais solicitada pelo tráfego, em cada uma das pistas. A superfície de avaliação corresponde a 3m antes e 3m depois de cada uma das estacas demarcadas, totalizando em cada estação uma área correspondente a 6m de extensão (BERNUCCI *et al.*, 2022).

De acordo com Vieira *et al.* (2016), o IGG é composto dos Índices de Gravidades Individual (IGI), que podem ser obtidos pelo produto entre a frequência relativa de cada grupo de defeitos e os fatores ponderação fixados pelo DNIT (2003). Além dos defeitos que contribuem para a ponderação, são também consideradas pelo IGG as medidas de afundamento de trilha de roda, aferida por uma treliça padronizada e régua milimétrica.

Estudo realizado por Espíndola *et al.* (2017), Silva, Oliveira e Araújo (2018) e Gonçalves e Espíndola (2020) apontaram que o IGG possibilitou a realização do diagnóstico da condição funcional das rodovias federais inspecionadas, retratando a qualidade do pavimento. Ainda de acordo com Gonçalves e Espíndola (2020), os defeitos mais comuns encontrados nos trechos avaliados foram trincas, afundamento de trilha de roda e buraco.



Vieira *et al.* (2016) abordaram que durante os levantamentos efetuados em campo, o parâmetro de avaliação IGG, não conseguiu abordar 100% dos defeitos existentes. Apesar disso, Rodrigues e Vaz (2016) discorrem que o IGG é de fácil utilização devido a sua simplicidade e uma ferramenta capaz de auxiliar os órgãos rodoviários nas tomadas de decisão acerca das atividades relacionadas à M&R. Além do mais, o uso do IGG é indicado quando se necessita de uma avaliação imediata e em grandes extensões (VIEIRA *et al.*, 2016).

Silva *et al.* (2022), ao avaliarem cinco vias municipais de Caucaia/CE pelo IGG, classificaram todos os trechos como ruins, apresentando problemas superficiais no pavimento. Após as atividades de requalificação executadas, constatou-se uma melhora na condição de serventia atual, refletindo em um aumento do conforto ao rolamento e na segurança. Por sua vez, Sousa *et al.* (2022) também concluíram, que os valores IGG estavam diretamente relacionados às condições do pavimento, observando que a piora na condição funcional do pavimento resultou no declínio dos valores do IGG.

MÉTODO DE PESQUISA

O método de pesquisa consistiu na aplicação do IGG em um pavimento asfáltico. Para isso, realizou-se uma revisão bibliográfica, seleção e inspeção do trecho, registrando todos os defeitos em um inventário. Com o levantamento realizado, calculou-se o IGG do trecho. A Figura 1 mostra um fluxograma das etapas de execução do presente estudo.



Figura 1 - Fluxograma das atividades executadas

De acordo com a SOP/CE (2023), o segmento da rodovia CE-513 estudada tem uma extensão de 4,66 km (Figura 2) e uma condição funcional regular, conforme levantado pelo SOP/CE por meio do LVC. Além disso, a SOP (2023) indica que a rodovia possui uma camada de revestimento em Areia Asfalto Usinada à Frio (AAUF), sendo que os defeitos do tipo painelas foram corrigidos com Pré-Misturado à Frio (PMF). As manutenções corretivas são executadas conforme o plano anual de conservação, o qual é elaborado após o levantamento do LVC.



Figura 2 – Vista do trecho inspecionado



[DOI: 10.29327/1430212.49-91](https://doi.org/10.29327/1430212.49-91)

CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL DE PAVIMENTO FLEXÍVEL POR MEIO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE GLOBAL:
ESTUDO DE CASO DA CE-513

Para o presente estudo, selecionou-se um trecho de 1 km em pista simples (Figura 3). O trecho foi escolhido por ser o local de acesso a vários lugares relevantes do município, como os pontos turísticos (Pedra da Galinha Choca e Açude do Cedro) e entre instituições de ensino (Universidade Federal do Ceará/UFC e o Instituto Federal do Ceará/IFCE). Por fim, conforme orientado pelo DNIT (2003), para se calcular o IGG do trecho, foi elaborado e preenchido o inventário do estado da superfície do pavimento, de acordo com os defeitos encontrados *in loco*.



Figura 3 – Vista panorâmica do trecho

RESULTADOS E DISCUSSÕES

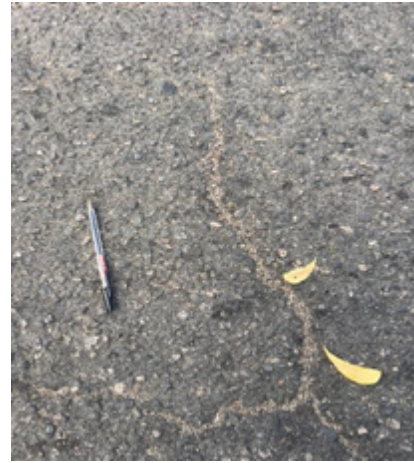
A avaliação encontrou diversos defeitos ao longo da superfície do pavimento, como panelas, remendos, fissuras, trincas longitudinais longas e curtas, trincas transversais longas e curtas, trincas do tipo couro de jacaré com e sem erosão, do tipo bloco com erosão e afundamentos plástico e consolidado local (Figura 4). Não foram encontradas trincas do tipo bloco sem erosão, exsudação e afundamentos de trilhas de rodas, e isso pode ser devido a manutenções corretivas na vida, realizadas em 2023. Apesar de existirem escorregamentos e ondulações ao longo do trecho, essas não estavam incluídas nas estações de trabalho avaliadas.



Arlene de Oliveira, José Wémenson Rabelo Chaves, Mariana de Araújo Leite,
Lucas Cavalcante de Almeida & Francisco Heber Lacerda de Oliveira



a) remendo



b) trinca transversal curta



c) trinca couro de jacaré com erosão



d) afundamento consolidado local



e) Panela



f) Desgaste

Figura 4 - Defeitos encontrados no trecho avaliado da rodovia CE-513



DOI: [10.29327/1430212.49-91](https://doi.org/10.29327/1430212.49-91)

**CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL DE PAVIMENTO FLEXÍVEL POR MEIO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE GLOBAL:
ESTUDO DE CASO DA CE-513**

Nos primeiros 400 m do trecho os remendos são predominantes, seguido das fissuras, desgastes e trincas couro de jacaré com erosão. As trincas em bloco com erosão e afundamentos plástico e consolidado local são os menos frequentes. De 400 a 600 m há maior incidência de fissuras e constatou-se que somente uma estação não apresentou defeitos. As trincas transversais longas e o afundamento local plástico foram os defeitos com menos frequência. Por fim, de 600 a 1000 m os remendos prevalecem em maior quantidade. As trincas transversais curtas e couro de jacaré com erosão ocorrem com menor frequência. A trinca transversal longa ocorre apenas em uma estação, assim como a trinca em bloco com erosão e o afundamento consolidado.

Dentre as principais causas para os defeitos encontrados existem algumas hipóteses, como possíveis erros na execução, na composição da mistura asfáltica, na imprimação e desintegração localizada na superfície do pavimento. Além disso, a compactação ineficiente das camadas no momento inadequado, a má execução da junta longitudinal que separa as duas faixas, o envelhecimento do pavimento e a presença de asfalto duro ou quebradiço também contribuem para tais problemas (CNT, 2018). No entanto, para identificar as causas reais dos defeitos presentes no trecho analisado, é imprescindível realizar uma avaliação estrutural no pavimento e um estudo detalhado nas camadas subjacentes por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos.

Observou-se que as trilhas de roda interna (TRI) e externa (TRE) são inexistentes pois não foram verificadas nas amostragens estudadas, apesar de existirem em alguns locais do trecho. Com os métodos e cálculos aplicados, no IGG do trecho de 1 km da rodovia CE-513 foi de 112, definindo a via como ruim. Esse resultado de IGG ocorre principalmente pela quantidade de remendos presentes em quase 70% das estações de trabalho.

Apesar dos percentuais mostrarem que os defeitos do tipo remendos e desgastes representam 66% e 36% das ocorrências, respectivamente, em relação a todos os defeitos, foram as trincas interligadas do tipo jacaré com erosão e em bloco com erosão que mais influenciaram para o IGG final. Devido ao seu alto fator de ponderação (0,8), essas trincas elevam o IGI, sendo superadas apenas dos remendos nesse aspecto. Por outro lado, as trincas isoladas curtas e longas e as interligadas do tipo jacaré sem erosão e em bloco sem erosão possuem o IGI mais baixo devido ao seu fator de ponderação. Apesar do desgaste apresentar alta incidência, seu fator de ponderação é 0,3, o que reduz o IGI correspondente. A Tabela 2 mostra a planilha de cálculo para o IGG da via analisada.



Tabela 2 - Planilha de cálculo do IGG com os resultados para a Rodovia CE-513

Trecho: 1 km		Revestimento: flexível			Estaca inicial: 1	
Subtrecho:		Data: 10/09/2023			Estaca final: 50	
Item	Natureza do trecho	Frequência absoluta	Frequência relativa	Fator de ponderação	Índice de gravidade individual	Nº de estações inventariadas
1	Trincas isoladas FI, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR	14	28	0,2	5,6	50
2	(FC-2) J, TB	6	12	0,5	6	IGG
3	(FC-3) JE, TBE	9	18	0,8	14,4	111,6
4	ALP, ATP, ALC, ATC	4	8	0,9	7,2	Conceito
5	O, P, E	14	28	1	28	Ruim
6	EX	0	0	0,5	0	
7	D	18	36	0,3	10,8	
8	R	33	66	0,6	39,6	
9	Média aritmética dos valores médios das flechas medidas em mm nas TRI e TRE	TRI = 0	TRE = 0	F = 0	0	
10	Média aritmética das variâncias das flechas medidas em ambas as trilhas	TRIV = 0	TREv = 0	FV = 0	0	
IGI = (F x 4/3) quando F ≤ 30				IGI = FV quando FV ≤ 50		
IGI = 40 quando F > 30				IGI = 50 quando FV > 50		

O valor de IGG mostra que a via analisada necessita de uma atenção quanto à sua restauração, pois apesar das manutenções corretivas recentes, o trecho apresenta locais em que o usuário tem uma redução da condição de conforto e segurança, em razão dos defeitos caracterizados. Como intervenções para melhorar esse pavimento pode ser feito um reforço ou reconstrução.

CONCLUSÕES

A análise mostrou que a aplicação do IGG permitiu a identificação dos defeitos presentes no trecho avaliado, bem como a sua avaliação qualitativa e quantitativa em termos de ocorrências com o objetivo de determinar o estado funcional da superfície do pavimento. A partir do levantamento dos defeitos, verificou-se a presença de trincas isoladas e interligadas, afundamentos plásticos e consolidados, painéis, desgastes e remendos, sendo possível concluir que o trecho avaliado apresenta um estado precário, uma vez que defeitos foram observados em quase todas as estações. É importante observar que não foram identificadas trilhas de roda no trecho, o que pode ser atribuído à realização de uma manutenção corretiva no pavimento em 2023.

Vale ressaltar que o IGG não conceitua integralmente o nível de gravidade dos defeitos, sendo necessário outros métodos para avaliar a condição do pavimento, como, por exemplo, uma avaliação estrutural destrutiva ou não destrutiva. Além das deficiências verificadas no pavimento, há indícios que as manutenções não são contínuas e executadas adequadamente.



DOI: [10.29327/1430212.49-91](https://doi.org/10.29327/1430212.49-91)

CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL DE PAVIMENTO FLEXÍVEL POR MEIO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE GLOBAL:
ESTUDO DE CASO DA CE-513

O IGG mostrou-se fundamental no presente estudo em um trecho urbano. Sua aplicabilidade foi satisfatória, pois possibilitou a caracterização do trecho e indicou possíveis intervenções para sua melhoria. Uma desvantagem é que o método analisa o trecho apenas de forma amostral, não sendo contabilizados os defeitos dos locais fora das estações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. F. M.; GONÇALVES, H. B. B.; SILVA, A. P.; OLIVEIRA, F. H. L. **Proposta de adaptação do índice de gravidade global para avaliação de tratamentos superficiais por penetração**. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Balneário Camboriú–SC. 2019. p. 1329-1339.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS. 2. ed. ABEDA, 2022.

CHAVES, S. J. L.; MAIA, C. L.; BASTOS, S. D. V.; OLIVEIRA, F. H. L. Impacto técnico e de custos das diferenças de classificação funcional de pavimentos rodoviários. **Revista Tecnologia**, v. 44, n.1, p.1–11. 2023.

CNT. **Relatório gerencial. Pesquisa CNT Rodovias**, Brasília, 9 nov. 2022. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/6b24f1b4-9081-485d-835d-c8aafac2b708>. Acesso em: 19 jan. 2023.

DNIT. **Norma DNIT 005/2003 – TER – Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2003.

ESPÍNDOLA, A. C.; CIRIACO, T. G. M.; VALOURA, L. R.; FERNANDES, P. G. P. S.; TEIXEIRA, M. A. **Diagnóstico da condição do pavimento das rodovias federais do estado de alagoas**. Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, de 29 de outubro a 01 de novembro de 2017.

FERNANDES JUNIOR, J. L.; ODA, S.; ZEBRINNI, L. F. **Defeitos e atividades de manutenção e reabilitação em pavimentos asfálticos**. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, 2006.

GONÇALVES, A. K. L.; ESPÍNDOLA, A. C. **Diagnóstico da condição dos pavimentos de rodovias federais do estado do Piauí**. Anais: 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET 100% Digital, 16 a 21 de novembro de 2020.

HAAS, R.; HUDSON, W. **Pavement Management Systems**. New York: Mcgraw-Hill, 1978.

MIRANDOLA A. M. **Proposta de metodologia de gestão e manutenção na restauração do pavimento urbano**. Dissertação (Pós-Graduação em Infraestrutura, Projetos e Gestão de Rodovias) – Centro Universitário de Lins/SP – Unilins. 2016.



NAKAHARA, S. M. **Estudo do Desempenho de Reforços de Pavimentos Asfálticos em Via Urbana sujeita a Tráfego Comercial Pesado**. São Paulo, 2005 Tese (Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2005.

SANTOS, J. C. B; OLIVEIRA, G. L; VIANNA, H. M. F. Avaliação do IGG na Avenida Olívia Flores do primeiro trecho em setembro de 2015 (estudo de caso). **C&D Revista Eletrônica da FAINOR, Vitória da Conquista**, v.10,n.2 p.2-13, 2017.

SILVA, M. C. **Avaliação funcional e estrutural das vias asfaltadas do campus da UFV**. 111 p. Dissertação de Pós-Graduação (Engenharia Civil-Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2006.

SILVA, J. P. DE OLIVEIRA, F. H. L. DE; ARAÚJO, C. B. C. DE. (2018). Análise funcional comparativa de trecho da BR-116 no estado do Ceará. **Revista Tecnologia**, v. 39, n. 2, p. 1–21, 2018.

SILVA, S. O.; CHAVES, J. W. R.; ALMEIDA, L. C.; OLIVEIRA, F. H. L. **Avaliação Funcional de Vias Urbanas por meio do Índice de Gravidade Global (IGG) - Estudo de Caso no Município de Caucaia - Ce**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 24.; REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 47., 2022, Rio Grande do Sul. Anais [...]. Rio Grande do Sul: ABDER; ABPV, 2022, p. 1011-1022.

SOUSA, J. L. C.; BUITRAGO, S. F. C.; ALMEIDAMAIA, L. CM.; OLIVEIRA, S. J. C.; OLIVEIRA, F. H. L. **Evolução temporal do índice de gravidade global de pavimentos asfálticos de uma rodovia federal brasileira**. . In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 2425. REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 47., 2023, Paraná. Anais [...]. Paraná, Foz do Iguaçu: ABDER; ABPV, 2023, p. 10111164-10221175.

VIEIRA, S. A; Pinho Jr., A. A. E; Oliveira, F. H. L; Aguiar, M. F. P. Análise comparativa de metodologias de avaliação de pavimentos através do IGG e PCI. **Revista Conexões, Ciência e Tecnologia**. v. 10, n. 3, p. 20- 30, 2016.

ZANCHETTA, F. **Aquisição de dados sobre a condição dos pavimentos visando a implementação de sistemas de gerência de pavimentos urbanos**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo, 2005.



VIAS PRINCIPAIS DE ACESSO À ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA EM SALVADOR: UM ESTUDO DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO VISUAL CONTÍNUO

Luan Trindade Lopes¹, Wilton Ferreira Copque¹ & Caroline Dias Amancio de Lima¹

RESUMO

Frente a necessidade de um monitoramento e devido sistema de gerenciamento de vias urbanas, o estudo analisou a situação do pavimento flexível em algumas ruas e avenidas de Salvador, Bahia, concentrando-se nas vias de acesso à Escola Politécnica da UFBA. Foram examinadas seis vias urbanas, incluindo as avenidas Centenário, Anita Garibaldi, Cardeal da Silva e as ruas Caetano Moura, Ladeira do Campo Santo e Padre Feijó. O método do Levantamento Visual Contínuo (LVC) foi utilizado para determinar três índices: o índice de condição dos pavimentos flexíveis (ICPF), o índice de gravidade global expedito (IGGE) e o índice do estado de superfície (IES). O estudo, de abordagem quantitativa e caráter descritivo, constatou que na época da análise as avenidas Centenário e Anita Garibaldi apresentaram menor incidência de defeitos no pavimento, com segmentos considerados de regular a ótimo. Já na avenida Cardeal da Silva e nas ruas Caetano Moura, Ladeira do Campo Santo e Padre Feijó, houve maior frequência de defeitos, especialmente na rua Caetano Moura, que foi classificada como péssima. Os principais defeitos identificados foram remendos, trincas isoladas e desgaste, presentes em todos os segmentos avaliados. Foram sugeridas possíveis causas para os defeitos observados, como falhas na seleção e dosagem de materiais, falta de controle tecnológico na construção ou erros de projeto. A partir desse método é possível visualizar propostas de ações de manutenção e restauração adequadas ao estado de cada via, variando de conservação rotineira a reconstrução em casos de defeitos generalizados. O estudo contribuiu para planejamento de intervenções futuras nas vias analisadas, visando à melhoria da infraestrutura urbana. Além disso, este tipo de levantamento, que exige pouca mão de obra e tempo, apesar de ter sido proposto para rodovias, pode ser uma ferramenta eficaz para um sistema de gestão de pavimentos urbanos.

PALAVRAS-CHAVE: Defeitos; Pavimento Flexível; LVC; Monitoramento.

ABSTRACT

Based on the need for monitoring and a proper urban pavements management system, the study analyzed the situation of flexible pavement in some streets and avenues in Salvador, Bahia, focusing on the access to the UFBA Polytechnic School. Six urban streets/avenues were studied: avenues Centenário, Anita Garibaldi, Cardeal da Silva and the streets Caetano Moura, Ladeira do Campo Santo and Padre Feijó. The Continuous Visual Survey (CVS) method was used to determine three indices: the flexible pavement condition index (ICPF), the expedited global gravity index (IGGE) and the surface state index (IES). The study, with a quantitative and descriptive approach, found that, at the time of the analysis, Centenário and Anita Garibaldi avenues had a lower incidence of pavement defects, with segments considered to be regular to excellent. On Cardeal da Silva Avenue and Caetano Moura, Ladeira do Campo Santo and Padre Feijó streets, there was a higher frequency of defects, especially on Caetano Moura street, which was classified as poor. The main defects identified were patches, isolated cracks and wear or raveling, present in all segments evaluated. Possible causes for the observed defects were suggested, such as failures in the selection and dosage of materials, lack of technological control in construction or design errors. Finally, maintenance and restoration actions can be proposed, ranging from routine conservation to reconstruction in cases of widespread defects. The study contributed to the planning of future interventions, aiming to improve urban infrastructure. Then, this type of method, despite proposed for highways, can be an effective tool to facilitate the monitoring activities of an urban pavement management system.

KEY WORDS: Defects. Flexible Pavement. Continuous Visual Survey.

¹ Universidade Federal da Bahia, luan.lopez@ufba.br; carolinedal@ufba.br.



INTRODUÇÃO

O desenvolvimento socioeconômico de uma região está estreitamente conectado à sua capacidade de transporte de mercadorias e pessoas. Assim, a infraestrutura rodoviária é fundamental para o progresso de um país e tem relação direta com seu potencial de crescimento, especialmente no Brasil. Nesse cenário, é vital que os pavimentos rodoviários sejam mantidos em boas condições de segurança, conforto e eficiência econômica.

As vias urbanas representam um grande patrimônio para a população de um determinado município, e para que sejam garantidos diversos objetivos sociais, econômicos e ambientais, é de extrema importância que se tenha uma política de manutenção e reabilitação dessas vias (LIMA *et al.*, 2008).

Quando um município apresenta uma malha viária urbana com certo grau de precariedade, demonstra a inexistência de um gerenciamento e planejamento que seja capaz de garantir condições minimamente razoáveis de segurança, conforto e economia a seus moradores. Com isso, exclui-se esses cidadãos de usufruir de bens públicos básicos dos quais têm direito, já que pagam impostos no exercício de sua cidadania (PRETTO *et al.*, 1996 *apud* FERNANDES, 2011).

De acordo com a Superintendência de Trânsito de Salvador (TRANSALVADOR, 2021), no ano de 2019, último ano antes da pandemia de Covid-19, foram registrados no município 4.193 sinistros de trânsito, com 4.856 feridos e 133 vítimas fatais. O órgão não faz referência qual parte do total de acidentes está ligada às condições do pavimento das vias urbanas, mas tais condições podem ter poder de influência nesses números. Por este motivo, entre outros citados, se faz necessário a realização de estudos que têm como objetivo identificar irregularidades e propor melhorias para a malha viária.

Em um estudo realizado em um trecho de 3,4 km, na via Regional em Salvador - Bahia, Barros e Mariani (2020) constataram que a via contava com diversos defeitos. Os mais encontrados foram as trincas interligadas, panelas e os remendos. A pesquisa foi realizada em um trecho onde já existia um projeto de requalificação através do recapeamento. Porém, a partir dos resultados encontrados, o projeto definiu como solução o recapeamento e em alguns pontos específicos foi sugerida uma intervenção na estrutura do pavimento.

Em outro estudo desenvolvido em Salvador, Rocha e Costa (2010) avaliaram a camada de revestimento do pavimento flexível na Avenida Pinto de Aguiar. Os defeitos mais comuns na via foram trincas, afundamentos, ondulações, remendos e panelas. A avaliação foi realizada através de uma observação tátil-visual e pela análise de fotografias tiradas durante uma inspeção a pé de toda a extensão das duas pistas da avenida. Com a análise dos resultados foi levantada a possibilidade de haver um problema estrutural em alguns trechos da via devido a presença de afundamentos. A solução proposta foi a construção de um reforço para a base existente, otimizar o sistema de drenagem e a aplicação de uma nova camada de revestimento.

Na perspectiva de segurança, como também no fato do pavimento ter de propiciar aos usuários boas condições de rolamento, com conforto e economia constata-se a necessidade de análise da camada de revestimento asfáltico de vias da cidade de Salvador, dentre elas de acesso à Escola Politécnica



DOI: [10.29327/1430212.49-99](https://doi.org/10.29327/1430212.49-99)

VIAS PRINCIPAIS DE ACESSO À ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA EM SALVADOR:
UM ESTUDO DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO VISUAL CONTÍNUO

da Universidade Federal da Bahia (UFBA). Segundo o Relatório Anual de Atividades (UFBA, 2020), no ano de 2019 a Escola Politécnica contava com uma comunidade de aproximadamente 5.800 pessoas, entre discentes de graduação e pós-graduação, docentes, servidores técnico-administrativos e terceirizados, que se deslocavam até a mesma para realização de suas atividades por meio dessas vias. Nos anos de 2020 e 2021, as atividades da Escola Politécnica aconteceram de forma remota devido às restrições geradas pela pandemia da COVID-19.

Logo, o objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar a existência de defeitos em caráter quantitativo e qualitativo e suas possíveis causas na superfície do pavimento asfáltico de vias que dão acesso à Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, no município de Salvador, através do Levantamento Visual Contínuo (LVC).

Dentre as vias existentes foram selecionadas seis: Avenida Centenário, Avenida Anita Garibaldi, Avenida Cardeal da Silva, Rua Caetano Moura, Ladeira do Campo Santo e Rua Padre Feijó, sendo que as quatro últimas foram avaliadas como sendo um único trecho. A escolha delas em detrimento das demais se dá ao fato de que estas vias além de servirem de acesso à Escola Politécnica da UFBA, são de grande importância social e econômica para a cidade de Salvador, pois interligam centros comerciais, centros de saúde, centros culturais e turísticos do município. Além disso, sabendo que a presença de defeitos na via pode ocasionar acidentes de trânsito, entre as principais ruas e avenidas na região da Escola Politécnica, essas são as que mais tiveram registro de sinistros no ano de 2019. Em ordem decrescente se tem: Av. Anita Garibaldi – 51 acidentes; Av. Centenário – 39 acidentes; Av. Cardeal da Silva + R. Caetano Moura + Ladeira do Campo Santo + R. Padre Feijó – 33 acidentes; Av. Reitor Miguel Calmon – 16 acidentes e Av. Adhemar de Barros – 7 acidentes (TRANSALVADOR, 2021).

Para a realização do estudo foram delimitados os seguintes objetivos específicos: identificar os principais tipos de defeitos presentes na via; apresentar o Índice de Condição de Pavimentos Flexíveis ou Semirrígidos (ICPF), o Índice de Gravidade Global Expedito (IGGE) e o Índice de Estado de Superfície (IES); apontar as possíveis causas dos defeitos encontrados e propor as soluções para recuperação do pavimento asfáltico.

DEFEITOS E AVALIAÇÕES EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Os pavimentos asfálticos podem apresentar danos na superfície devido ao uso, à ação do tempo ou a erros de projeto, como seleção incorreta de materiais ou falhas na execução ou manutenção do pavimento. Um bom projeto de pavimento deve satisfazer demandas funcionais, estruturais e de segurança, garantindo um bom desempenho das camadas e subleito, com capacidade de suporte e vida útil adequadas ao tipo de obra e tráfego. Para os usuários, o conforto é o aspecto mais importante, pois uma superfície irregular pode comprometer não apenas o conforto de rolamento, mas também aumentar os custos de manutenção dos veículos, o tempo de viagem e o consumo de combustível. Assim, rodovias que atendem bem aos usuários contribuem para reduzir custos de transporte. (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Para atender as condições satisfatórias de desempenho do pavimento nos diferentes sentidos, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) tem manuais diversos, especificações técnicas e normativas. Dentre eles há alguns focados em defeitos como a norma



DNIT 005/2003 – TER “Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos” (DNIT, 2003a), que faz uma listagem dos tipos de defeitos que podem ser encontrados na superfície dos pavimentos, e a DNIT 008/2003 – PRO “Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos” (DNIT, 2003b), que detalha o procedimento deste método de avaliação.

As avaliações de um pavimento indicam que ações de manutenção e/ou reabilitação devem ser tomadas para que o mesmo desempenhe adequadamente suas funções estruturais, de segurança e de conforto, tomando-se como base o levantamento dos defeitos. Os defeitos podem ser resumidos da seguinte forma: fenda (F), afundamento (A), corrugação e ondulações transversais (O), exsudação (espalhamento de ligante) (EX), desgaste ou desagregação (D), panelas ou buracos (P) e remendos (R).

Levantamento Visual Contínuo

Como mencionado anteriormente, o LVC é um método padronizado pelo DNIT e consiste em quantificar os defeitos presentes no revestimento da via. Para tal, estabelece a determinação de três índices: o ICPF, o IGGE e o IES, que indicam o grau de deterioração do revestimento asfáltico.

As vias avaliadas devem ser divididas em segmentos com comprimento mínimo de 1 km e máximo de 6 km, sendo que em cada segmento os defeitos na pista devem ser quantificados e de acordo com a frequência, recebem os códigos A, M ou B, frequência alta, média ou baixa, respectivamente.

Após a avaliação dos defeitos é estimado o ICPF, um índice calculado pelo avaliador, para cada segmento analisado, de acordo com a média das frequências de cada defeito. O IGGE também é dependente das frequências dos defeitos na via. De acordo com a frequência dos defeitos, são determinados as gravidades e os pesos, que por sua vez são aplicados numa expressão afim de obter o IGGE. Por fim, o IES é uma correlação entre o ICPF e o IGGE, em que cada segmento da via avaliada recebe um conceito sendo considerado péssimo, ruim, regular, bom ou ótimo.

A norma DNIT 008/2003 – PRO (DNIT, 2003b) define ainda condições para o levantamento:

- No levantamento visual contínuo deve ser usado um veículo equipado com velocímetro/odômetro para aferição da velocidade de operação e das distâncias percorridas;
- Deve ser evitada a realização do levantamento em dias chuvosos, com muita neblina, ou com pouca luz natural;
- A equipe necessária para a realização do levantamento visual contínuo deve ser constituída preferencialmente de no mínimo dois técnicos, além do motorista do veículo;
- O veículo deve ser operado a uma velocidade média aproximada de 40 km/h;
- O levantamento deve ser feito sendo percorrido um único sentido (rodovia de pista simples). No caso de rodovias com pista dupla o levantamento será feito para cada pista em separado;
- A divisão dos trechos em segmentos deverá ser tal que se obtenha uma extensão mínima de 1 km e máxima de 6 km. (O segmento pode ter menos de 1 km em casos de final do trecho, mudanças bruscas no estado de conservação, no tipo de revestimento, espessura, na idade do pavimento, etc.);
- A avaliação da via de ser feita sem sair do veículo, avaliando visualmente os defeitos (dimensões e tipos).



DOI: [10.29327/1430212.49-99](https://doi.org/10.29327/1430212.49-99)

VIAS PRINCIPAIS DE ACESSO À ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA EM SALVADOR:
UM ESTUDO DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO VISUAL CONTÍNUO

DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A pesquisa foi um estudo de caso do tipo descritiva, com finalidade aplicada e abordagem quantitativa, na qual foram desenvolvidos trabalhos de campo, por meio de levantamentos nas vias selecionadas, e escritório para informações secundárias e análises dos resultados. Quanto a finalidade deste estudo, se enquadra em uma pesquisa do tipo aplicada, pois visou aplicar o conhecimento gerado de modo a alterar determinado aspecto do seu objeto de estudo, partindo de conhecimentos desenvolvidos anteriormente.

De forma resumida, o método utilizado para este estudo foi o LVC, padronizado pelo DNIT 008/2003 – PRO (DNIT, 2003b), aplicado a seis vias urbanas: avenida Centenário, avenida Anita Garibaldi, avenida Cardeal da Silva, rua Caetano Moura, ladeira do Campo Santo e rua Padre Feijó.

Localização e Características das Vias

As seis vias analisadas dão acesso à Escola Politécnica da UFBA e ao todo foram avaliados uma extensão de aproximadamente 14,13 km, levando em consideração que a Avenida Centenário e a Avenida Anita Garibaldi são de pista dupla, sendo avaliadas nos dois sentidos.

Estas vias escolhidas para realização deste estudo, além de servirem de acesso à Escola Politécnica da UFBA, são de grande importância social e econômica para a cidade de Salvador. Cortam ou margeiam bairros como Barra, Graça, Ondina, Canela, Federação, Engenho Velho da Federação e Rio Vermelho, que de acordo com o censo de 2010, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas - IBGE (IBGE, 2010 *apud* SALVADOR, 2017), totalizam uma população aproximada de 140.000 pessoas.

A Avenida Centenário (Figura 1a) é uma via de pista dupla que possui, em seus dois sentidos, uma extensão de 5.320 m, sendo que destes, 760 m são de pavimento rígido. Em cada pista possui trechos alternados que possuem duas ou três faixas de rolamento com 6 ou 9 metros de largura, respectivamente. Ela é delimitada pela Rua Airosa Galvão, na Barra, e pela Praça Dr. João Mangabeira, no Vale dos Barris. É classificada como via arterial I, de acordo com a Secretaria Municipal de Urbanismo do Município de Salvador (SUCOM, 2016). A via arterial é caracterizada por interseções em nível, na maioria das vezes é controlada por semáforo, com acessibilidade aos lotes lindeiros e às vias secundárias e locais, possibilitando o trânsito entre as regiões da cidade.

A Avenida Anita Garibaldi (Figura 1b) possui uma extensão de aproximadamente 6.300 m considerando suas duas pistas. Cada sentido tem três faixas de rolamento e nove metros de largura. Para este trabalho foram avaliados 5.300 m, trecho entre a Praça Lord Cochrane e o cruzamento com a Avenida Vasco da Gama, no Lucaia. De acordo com a Secretaria Municipal de Infraestrutura e Obras Públicas de Salvador - Seinfra (SEINFRA, 2017), sua última requalificação asfáltica com recapeamento da camada de revestimento havia sido no ano de 2017, por meio da Superintendência de Obras Públicas (SUCOP). Assim como a Av. Centenário, é classificada pela SUCOM como via arterial I.

Já a Avenida Cardeal Da Silva, Rua Caetano Moura, Ladeira do Campo Santo e Rua Padre Feijó foram avaliadas de maneira conjunta, pois formam uma via contínua com uma extensão de 4.270 m, aproximadamente, sendo denominado neste trabalho simplesmente de Avenida Cardeal da Silva. O



trecho foi delimitado pela Rua José Taboada Vidal, no bairro do Rio Vermelho até o limite com a Rua João das Botas, no bairro do Canela. Todas elas são pista simples com sentido duplo e foram avaliadas sendo percorridas em um único sentido. São classificadas pela SUCOM como vias coletoras I, que são aquelas destinadas a coletar e distribuir o trânsito que tenha necessidade de entrar ou sair das vias de trânsito rápido ou arteriais, possibilitando o trânsito dentro das regiões da cidade. Na Figura 1c fica claro que essas quatro vias formam um único trecho, motivo pelo qual foram avaliadas de forma conjunta. É possível observar também que este trecho, na altura da rua Caetano Moura, passa pela Escola Politécnica da UFBA, servindo de acesso direto à mesma.



Figura 1. Trechos avaliados neste estudo: (a) Av. Centenário, (b) Av. Anita Garibaldi e (c) conjunto composto pela R. Padre Feijó, Ladeira do Campo Santos, R. Caetano Moura e Av. Cardeal da Silva

Método de Avaliação

O levantamento se iniciou com o preenchimento de formulário fornecido pelo DNIT através da Norma DNIT 008/2003 – PRO (DNIT, 2003b). Apesar de ser um método que tem como objeto o estudo nas rodovias, este pode vir a ser utilizado para vias urbanas como já realizado por outros pesquisadores (Dresch, 2014; Júnior *et al.*, 2019; Veras, 2017).

Seguindo as determinações do DNIT (2003b), os trechos estudados foram divididos em segmentos com extensão mínima de 1 km, exceto em situações em que houve mudança do tipo de revestimento ou em final de trecho. Os defeitos que foram analisados são os dispostos na norma DNIT 005/2003 – PRO (DNIT, 2003a), sendo eles: Panela (P); Remendo (R); Trinca Isolada (TR); Trinca Couro de Jacaré (TJ); Trinca Bloco (TB); Afundamento (AF); Ondulação (O); Desgaste (D); Exsudação (EX) e Escorregamento (E). Como preconizado na norma DNIT (2003b), no modelo de formulário quando preenchido em campo, foram registrados códigos de acordo com uma estimativa de qualidade e porcentagem de cada defeito. Os códigos “A”, “M” ou “B”, como apresentado na Tabela 1, indicam uma frequência alta, média ou baixa, respectivamente.

Após o levantamento foram calculados os índices que indicam a qualidade da superfície do pavimento. O ICPF é um índice calculado pelo avaliador, para cada segmento analisado, de acordo com a média dos índices contidos no formulário de levantamento. Como mostra a Tabela 2, é definida uma nota que varia de 0 a 5, relacionada ao grau de intervenção para que a qualidade da camada de revestimento seja mantida. A precisão do valor do índice é aproximadamente de 0,5.



DOI: 10.29327/1430212.49-99

VIAS PRINCIPAIS DE ACESSO À ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA EM SALVADOR:
UM ESTUDO DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO VISUAL CONTÍNUO

Tabela 1. Frequência de defeitos (DNIT, 2003b)

Painéis (P) e Remendos (R)		
Código	Frequência	Quant./km
A	Alta	≥ 5
M	Média	2 – 5
B	Baixa	≤ 2
Demais defeitos		
Código	Frequência	% por km
A	Alta	≥ 50
M	Média	50 – 10
B	Baixa	≤ 10

Tabela 2. Frequência de defeitos para o ICPF (DNIT, 2003b)

Conceito	Descrição	ICPF
Ótimo	NECESSITA APENAS DE CONSERVAÇÃO ROTINEIRA	5 - 4
Bom	APLICAÇÃO DE LAMA ASFÁLTICA - Desgaste superficial, trincas não muito severas em áreas não muito extensas.	4 - 3
Regular	CORREÇÃO DE PONTOS LOCALIZADOS OU RECAPEAMENTO - pavimento trincado, com “painéis” e remendos pouco frequentes e com irregularidade longitudinal ou transversal.	3 - 2
Ruim	RECAPEAMENTO COM CORREÇÕES PRÉVIAS - defeitos generalizados com correções prévias em áreas localizadas - remendos superficiais ou profundos.	2 - 1
Péssimo	RECONSTRUÇÃO - defeitos generalizados com correções prévias em toda a extensão. Restauração do revestimento e das demais camadas - infiltração de água e descompactação da base.	0 - 1

Para o cálculo do IGGE, de acordo com a frequência de cada defeito, foi definida a gravidade (Tabela 3), a partir da qual, por sua vez, foram definidos os pesos (Tabela 4). Com esses parâmetros pode ser calculado o IGGE através de uma expressão (Equação 1). Por fim, foi calculado o IES em função do ICPF e do IGGE. Compreende valores entre 0 e 10 como mostrado na Tabela 5, juntamente com o código e o conceito do estado da superfície.

$$IGGE = (P_t \times F_t) + (P_{oap} \times F_{oap}) + (P_{pr} \times F_{pr}) \quad (1)$$

Onde,

Ft, Pt = Frequência e Peso do conjunto de trincas t;

Foap, Poap = Frequência e Peso do conjunto de deformações;

Fpr, Ppr = Frequência (quantidade por km) e Peso do conjunto de painéis e remendos.



Tabela 3. Determinação do índice de gravidade IGGE (DNIT, 2003b)

Painéis (P) e Remendos (R)			
Frequência	Fator Fpr	Quantidade/km	Gravidade
A - Alta		≥ 5	3
M - Média		2 – 5	2
B - Baixa		≤ 2	1
Demais defeitos (trincas, deformações)			
Frequência	Fatores Ft e Foap	%	Gravidade
A - Alta		≥ 50	3
M - Média		50 – 10	2
B - Baixa		≤ 10	1

Tabela 4. Pesos para cálculo do IGGE (DNIT, 2003b)

Gravidade	Pt	Poap	Ppr
3	0,65	1,00	1,00
2	0,45	0,70	0,80
1	0,30	0,60	0,70

Tabela 5. Índice do estado de superfície do pavimento (DNIT, 2003b)

Descrição	IES	Código	Conceito
$IGGE \leq 20$ e $ICPF > 3,5$	0	A	ÓTIMO
$IGGE \leq 20$ e $ICPF \leq 3,5$	1	B	BOM
$20 \leq IGGE \leq 40$ e $ICPF > 3,5$	2		
$20 \leq IGGE \leq 40$ e $ICPF \leq 3,5$	3	C	REGULAR
$40 \leq IGGE \leq 60$ e $ICPF > 2,5$	4		
$40 \leq IGGE \leq 60$ e $ICPF \leq 2,5$	5		
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF > 2,5$	7	D	RUIM
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF \leq 2,5$	8		
$IGGE > 90$	10	E	PÉSSIMO

Seguindo a norma DNIT (2003b), foi utilizado um veículo equipado com velocímetro, para que pudesse ser assegurada uma velocidade média aproximada de 40 km/h, e com odômetro para verificação das distâncias percorridas. O levantamento foi realizado sem sair do veículo como indicado, avaliando visualmente as dimensões e tipos dos defeitos considerados, por uma equipe composta por dois avaliadores, como recomendado. Além dos avaliadores, a equipe de campo também foi composta pela condutora do veículo.

Nas Avenidas Centenário e Anita Garibaldi, que possuem pista dupla, foram avaliadas as duas pistas, na faixa mais solicitada, ou seja, faixa da direita. Adicionalmente, foram feitos registros com câmeras para posterior análises, caso necessário. A Avenida Centenário e a Avenida Anita Garibaldi, por terem pista dupla, foram avaliadas nas duas pistas. Já para a Avenida Cardeal da Silva, juntamente com as ruas Caetano Moura, Ladeira do Campo Santo e Padre Feijó, que possuem pista simples, a avaliação foi realizada em um único sentido, sendo analisada as duas faixas de forma simultânea. Este levantamento foi realizado como recomendado pela DNIT

DOI: [10.29327/1430212.49-99](https://doi.org/10.29327/1430212.49-99)VIAS PRINCIPAIS DE ACESSO À ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA EM SALVADOR:
UM ESTUDO DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO VISUAL CONTÍNUO

(2003d): os trechos de rodovias de pista simples foram levantados em um único sentido, levando-se em consideração simultaneamente as duas ou mais faixas de tráfego; em trechos de rodovias de pista dupla, o LVC foi realizado separadamente para cada uma das pistas, levando-se em consideração simultaneamente as duas ou mais faixas de rolamento de cada uma dessas pistas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

De maneira resumida, os defeitos mais observados na Av. Centenário foram o remendo, a trinca isolada e o desgaste, presente em todos os 6 segmentos. A trinca do tipo couro de jacaré, está presente em 5 segmentos (1, 2, 3, 4 e 5), seguida da panela (1 e 5), da exsudação (2 e 3) e do escorregamento (4 e 5), presentes em 2 segmentos. Por último a ondulação que está presente apenas no segmento 3. A trinca do tipo bloco e o afundamento não foram observados nesta via. Os mais observados na Av. Anita Garibaldi foram o remendo, a trinca isolada, o desgaste e a trinca do tipo couro de jacaré, presentes em todos os 6 segmentos. O afundamento (1, 4, e 5) e o escorregamento (1, 3, e 5) estão presentes em 3 segmentos, seguidos da panela (4, e 5) observadas em 2 segmentos e da exsudação presente apenas do segmento 1. A trinca do tipo bloco e o defeito de ondulação não foram observados em nenhum segmento desta avenida. Já no caso da compilação das vias que dão continuidade à Av. Cardeal da Silva, foram: o remendo, a trinca do tipo couro de jacaré, o desgaste e a trinca isolada, presente em todos os 5 segmentos. A panela e a ondulação estiveram presentes em 4 segmentos, sendo eles 1, 2, 3 e 4. Em seguida vieram o afundamento e a exsudação, observados nos segmentos 1, 2 e 3 e o escorregamento, presente nos segmentos 1, 2 e 5. A trinca do tipo bloco não foi observada em nenhum segmento deste agrupamento.

Ao total, foi avaliada uma extensão de aproximadamente 14,13 km, levando em consideração que a Avenida Centenário e a Avenida Anita Garibaldi são de pista dupla, sendo analisadas nos dois sentidos. Na Tabela 6 está apresentada uma análise geral das vias estudadas, demonstrando a quantidade de segmentos com uma frequência alta, média ou baixa para cada tipo de defeito. Como destaque, o defeito remendo foi observado em todas os 17 segmentos, sendo que destes, 12 apresentaram uma frequência alta. Por outro lado, a trinca do tipo bloco não foi identificada em nenhum segmento.

Tabela 6. Aspecto geral da frequência de defeitos nas vias analisadas neste estudo

Defeitos	Frequência dos defeitos*				Total de segmentos com defeito
	A	M	B	Sem defeito	
Panela	0	3	5	9	9
Remendo	12	4	1	0	17
TR	0	2	15	0	17
TJ	0	4	12	1	16
TB	0	0	0	17	0
Afundamento	0	1	5	11	6
Ondulação	0	1	4	12	5
Desgaste	1	5	11	0	17
Exsudação	0	0	6	11	6
Escorregamento	0	1	7	9	8

*A - alta; M - média; B - baixa.



Dos 17 segmentos avaliados, com base no IES, 1 foi considerado como ótimo, 5 foram considerados como bom, 8 em estado regular, 2 em situação ruim e 1 foram avaliados como péssimo. Nota-se que a quantidade segmentos conceituados como bom ou ótimo - 6 segmentos -, é superior a quantidade de segmentos com conceito ruim ou péssimo - 3 segmentos. Estes conceitos podem ser vistos em termos percentuais no gráfico da Figura 2, e em mapa, na Figura 3, onde são apresentados os 3 trechos avaliados com as delimitações dos segmentos.

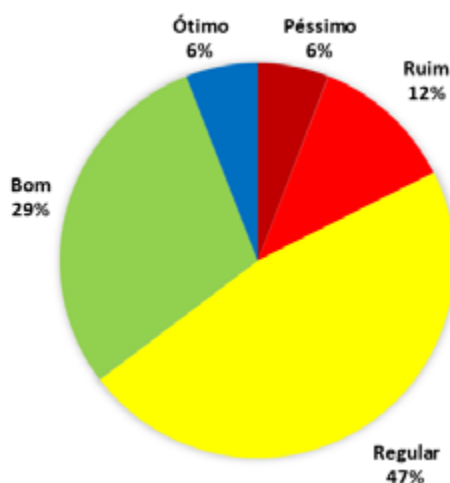


Figura 2. Aspecto geral dos conceitos dos pavimentos das vias analisadas neste estudo, conforme IES

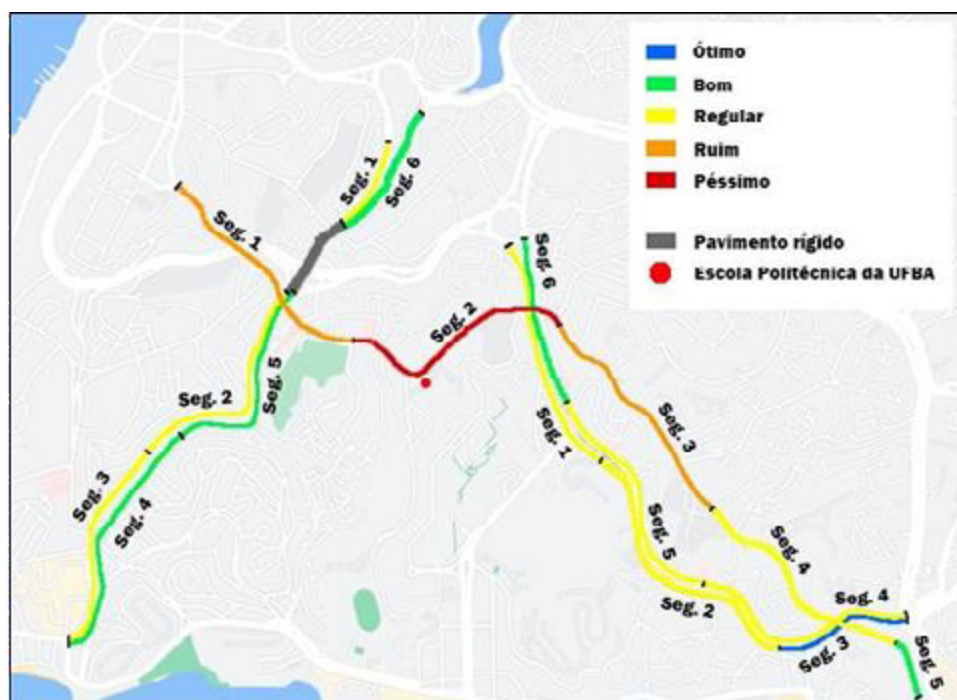


Figura 3. Aspecto geral dos conceitos dos pavimentos das vias analisadas neste estudo com a divisão dos segmentos de cada uma delas, conforme IES



DOI: [10.29327/1430212.49-99](https://doi.org/10.29327/1430212.49-99)

VIAS PRINCIPAIS DE ACESSO À ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA EM SALVADOR:
UM ESTUDO DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO VISUAL CONTÍNUO

A partir da observação da Figura 3 é possível identificar mais claramente a delimitação dos segmentos nos trechos e como foram classificados quanto ao estado da superfície. As vias que apresentam uma maior necessidade de intervenção são a Rua Caetano Moura, que serve de acesso direto à Escola Politécnica da UFBA, seguida da Rua Padre Feijó, da Ladeira do Campo Santo e parte da Avenida Cardeal da Silva. Outro fato observado é que, na Avenida Centenário, toda a pista no sentido Dique do Tororó – Shopping Barra recebeu um conceito regular, enquanto que toda a pista no sentido contrário foi conceituada como bom. A Avenida Anita Garibaldi foi a única via que apresenta um segmento conceituado como ótimo, o último segmento do sentido Praça Lord Cochrane - Lucaia.

Com relação à determinação das causas e a definição de ações corretivas para os defeitos observados, devem ser precedidas de uma avaliação mais detalhada do pavimento, como uma avaliação estrutural, por exemplo. Este trabalho, porém, se limitou a uma avaliação da camada superficial do pavimento e juntando a isso, encontrou-se dificuldade na coleta de informações sobre tipos de material e espessuras das camadas do pavimento das vias em análise perante aos órgãos públicos responsáveis. A partir do próprio método é possível a definição de possíveis intervenções como apresentado na Tabela 2.

Dessa maneira, o método possibilitou uma observação rápida e não invasiva das vias, com uma demanda mínima de mão de obra e materiais. Isso facilita sua aplicação em levantamentos iniciais para oferecer uma visão abrangente da situação das vias e já sugerir possíveis intervenções. Portanto, trata-se de uma excelente opção para sistemas de gestão de vias urbanas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado neste trabalho foi relevante, pois os pavimentos urbanos também têm impacto direto no desenvolvimento socioeconômico de regiões para o escoamento de mercadorias e movimentação de pessoas, precisando também da devida atenção dos órgãos responsáveis. A qualidade da superfície do pavimento influencia a segurança, a economia e o conforto do transporte.

As avenidas Centenário e Anita Garibaldi mostraram menores frequências de defeitos em suas camadas de revestimento, com segmentos avaliados como regular, bom ou ótimo. Por outro lado, a Avenida Cardeal da Silva e as ruas Caetano Moura, Ladeira do Campo Santo e Padre Feijó apresentaram maior incidência de defeitos, especialmente na Rua Caetano Moura, a única a receber classificação péssima em todo o estudo.

Os principais defeitos identificados foram remendos, trincas isoladas e desgaste, presentes em todos os segmentos avaliados. A análise dos índices ICPF, IGGE e IES confirmou que, embora todos os segmentos apresentassem algum defeito, 35% foram classificados como ótimo ou bom, 47% como regular e 18% como ruim ou péssimo. A partir dos resultados, foram sugeridas possíveis causas para os defeitos e medidas de manutenção ou restauração apropriadas ao estado de cada segmento, auxiliando órgãos públicos nas decisões de intervenções. As recomendações incluem desde conservação rotineira para segmentos ótimos, até reconstrução para segmentos péssimos.

Em relação à segurança, os defeitos dos pavimentos avaliados, embora possam não ser a causa direta de acidentes, podem contribuir para riscos se associados a outros fatores, como ambientais ou



humanos. O conforto ao dirigir é particularmente comprometido em alguns trechos das ruas Padre Feijó e Caetano Moura, que demandariam maior investimento para recuperação do pavimento devido a suas classificações ruins ou péssimas.

Logo, esse estudo corrobora que métodos como o LVC podem ser uma ferramenta valiosa no gerenciamento de pavimentos urbanos, auxiliando nas estratégias de manutenção e melhoria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, M.; MARIANI, B. Análise de defeitos superficiais em pavimentos flexíveis da cidade de Salvador, Bahia. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – CBPAT 2020. Associação Brasileira de Patologia das Construções. Fortaleza – CE, 2020.

BERNUCCI, L. L. B. et al., Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. 1ª Ed. - Rio de Janeiro: Petrobrás ABEDA, 2008.

DNIT 005/2003 – TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos - Terminologia. Rio de Janeiro, 2003a.

DNIT 008/2003 – PRO: Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003b.

DRESCH, F. Gerência de pavimentos urbanos: utilização de levantamento visual contínuo para avaliação das vias principais pavimentadas de Santa Rosa/RS. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2014.

FERNANDES, F.A.T. Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento para conservação do pavimento de vias urbanas, através de um sistema de informações geográficas (SIG). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 99. 2011.

JUNIOR, T. L. e S. et al. Utilização do método de levantamento visual contínuo (LVC) para avaliação de vias pertencentes a cidade de Maceió/al. Ciências exatas e tecnológicas. Alagoas. v. 5, n.2, p. 213-222, maio 2019.

LIMA, J.P.; RAMOS, R.A.R; JUNIOR, J.L.F. Estudo de mapas de priorização de pavimentos urbanos com o uso de SIG e a metodologia de análise multicritério. In 15ª Reunião de Pavimentação Urbana. Salvador, 2008.

ROCHA, R.S e COSTA, E.A.L. Patologias de Pavimentos Asfálticos e Suas Recuperações. Estudo de Caso da Av. Pinto de Aguiar. Universidade Católica de Salvador. BA. 2010.

SALVADOR, Prefeitura Municipal de. Lei nº 9.299, de 7 de dezembro de 2017.

SEINFRA. Secretaria Municipal de Infraestrutura e Obras Públicas. Requalificação asfáltica da Avenida Garibaldi está 45% concluída. Salvador, 26 de out. 2017.

SUCOM. Secretaria Municipal de urbanismo. Lei do ordenamento do uso e da ocupação do solo. Classificação viária. Salvador, 2016.

TRANSALVADOR. Superintendência de Trânsito. Relatório de Trânsito. Salvador, 2021.

VERAS, L. S.. Avaliação da serventia de um trecho de pavimento da cidade de Mossoró/RN através do levantamento visual contínuo (LVC). 2017.

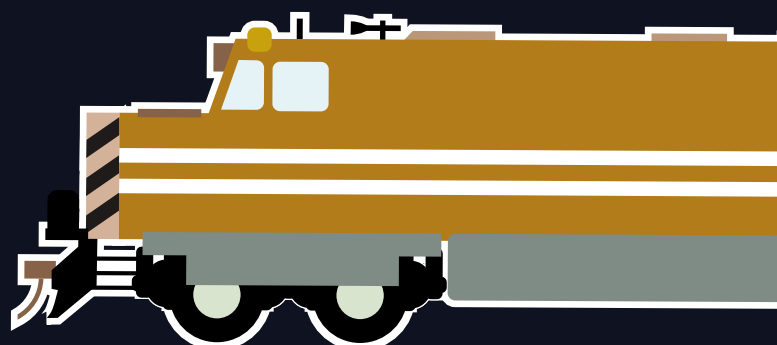


26° Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br



ABDER



**DIMENSIONAMENTO DE
PAVIMENTOS: ENSAIOS,
CRITÉRIOS E METODOLOGIAS**

PROGRAMAÇÃO
TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS E ESTUDOS DE CASOS DE OBRAS
Terça-feira, 20 de agosto

SALA PIRAMBU		
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS: ENSAIOS, CRITÉRIOS E METODOLOGIAS (ST03)		
⌚ 09:00	TT085	ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA ENTRE DIFERENTES EQUIPAMENTOS TRIAXIAIS COM MATERIAL SINTÉTICO
⌚ 09:20	EC281	IMPACTO ECONÔMICO NA PAVIMENTAÇÃO QUANDO DA ANÁLISE MECANÍSTICA-EMPÍRICA CONSIDERANDO MÓDULOS DE RESILIÊNCIA TEÓRICOS E OBTIDOS POR ENSAIOS
⌚ 09:40	TT736	ASPECTOS RELEVANTES DA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA USO EM ANÁLISES NO MEDINA
⌚ 10:40	TT637	ESTUDO DE REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS DEFLECTOMÉTRICOS REALIZADOS COM O TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER DEVICE (TSDD) NO BRASIL
⌚ 11:00	TT682	PARTICULARIZAÇÃO DO FATOR DE AJUSTAMENTO DAS DEFLEXÕES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS
⌚ 11:20	TT761	INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE NO CÁLCULO DO NÚMERO DE SOLICITAÇÕES AO EIXO-PADRÃO PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO
⌚ 11:40	TT887	PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DE VOLUME DE TRÁFEGO DE SEGMENTOS EXPERIMENTAIS PRO – MEDINA A PARTIR DE DADOS DO PNCT
⌚ 12:00	TT820	ANÁLISE DE RISCO EM FUNÇÃO DO CONTROLE TECNOLÓGICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL
⌚ 12:20	EC857	EFEITO DO EXCESSO DE CARGA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: ESTUDO DE CASO EM MINAS GERAIS
⌚ 12:40	TT248	COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS 3D E 3D AXISSIMÉTRICO NA ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO VERTICAL DO SUBLEITO SOB CARGA AEROPORTUÁRIA



ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA ENTRE DIFERENTES EQUIPAMENTOS TRIAXIAIS COM MATERIAL SINTÉTICO

Priscila Oliveira Folly¹; Camila Antunes Martins¹; Luisa Carla de Alencar Menezes¹; Antônio Carlos Rodrigues Guimarães¹

RESUMO

Verifica-se, atualmente, esforços governamentais contínuos que visam a adoção de métodos mecanísticos para o dimensionamento de pavimentos, destacando a necessidade crucial de padronizar componentes e métodos associados aos ensaios de laboratório. Especificamente, no que se refere ao ensaio de Módulo Resiliente (MR) de solos e britas, existe uma considerável variedade de equipamentos, entre eles modelos nacionais e importados que, eventualmente, podem ter diferentes atualizações. Dessa forma, torna-se fundamental identificar divergências entre os resultados obtidos em diferentes equipamentos, utilizando como referência as exigências estipuladas nas normas técnicas. Nesse contexto, o presente estudo visa observar o comportamento resiliente do nylon 6.0, um material com propriedades e características mecânicas estabelecidas. Para tanto, foram conduzidos ensaios de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo DNIT 134/2018-ME, com o objetivo de determinar, por meio de parâmetros estatísticos, os resultados que melhor representam o comportamento do nylon em dois equipamentos distintos, denominados neste estudo de A e B. Tendo em vista os deslocamentos (LVDT's) e os diferentes métodos empregados para aplicação de tensão, ratifica-se a importância da implementação de um método de calibração de equipamentos triaxiais, afim de aumentar a confiabilidade dos resultados. O estudo contribui significativamente para o avanço na padronização e na precisão dos ensaios de módulo resiliente de solos e britas, fornecendo informações importantes para a melhoria contínua dos métodos de projeto de pavimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Módulo de Resiliência; Calibração; Equipamento Triaxial Dinâmico.

ABSTRACT

Currently, there are continuous government efforts aimed at adopting mechanistic methods for pavement design, highlighting the crucial need to standardize components and methods associated with laboratory tests. Specifically, regarding the Resilient Modulus (MR) test of soils and aggregates, there is a considerable variety of equipment, including both domestic and imported models, which may eventually have different updates. Therefore, it is essential to identify discrepancies among the results obtained from different equipment, using the requirements stipulated in technical standards as a reference. In this context, the present study aims to observe the resilient behavior of nylon 6.0, a material with established mechanical properties and characteristics. To this end, tests were conducted following the guidelines established by DNIT 134/2018-ME, with the objective of determining, through statistical parameters, the results that best represent the behavior of nylon in two different equipment, referred to in this study as A and B. Considering the displacements (LVDTs) and the different methods employed for applying tension, the importance of implementing a calibration method for triaxial equipment is emphasized to increase the reliability of the results. The study significantly contributes to the advancement of standardization and precision in resilient modulus tests of soils and aggregates, providing important insights for the continuous improvement of pavement design methods.

KEY WORDS: Resilient Modulus; Calibration; Dynamic Triaxial Equipment.

¹ Instituto Militar de Engenharia, priscilafolly@ime.eb.br; camilaantunes@ime.eb.br; luisacarlaam@hotmail.com; guimaraes@ime.eb.br.



INTRODUÇÃO

O pavimento deve ser dimensionado de forma que possa garantir a segurança operacional, estabilidade e eficiência para os veículos transitarem em diversas velocidades, sob diferentes cargas por eixo. Para assegurar que a via desempenhe de forma adequada tal finalidade, é fundamental que os materiais empregados na pavimentação estejam em conformidade com as normas estabelecidas. É a geometria da via também deve atender aos parâmetros geométricos normatizados, a fim de que todos os componentes do sistema desempenhem suas funções de forma adequada em diversas condições operacionais e ambientais (INDRARATNA; SALIM; RUJIKIATKAMJORN, 2011).

O ensaio para determinação do Módulo de Resiliência (MR) é fundamental na compreensão acerca do comportamento resiliente dos materiais de pavimentação, isto é, sua capacidade em retornar ao seu estado inicial após o término do carregamento exercido pelo tráfego. A obtenção deste parâmetro auxilia na previsão do comportamento mecânico do pavimento a partir da análise dos fatores que causam deformação e deterioração na via (BATHURST; RAYMOND, 1987).

No que diz respeito ao ensaio para determinação do MR, Ferreira (2008) destaca que, para que os resultados obtidos sejam representativos, isto é, apresentem nível de confiabilidade adequado, é necessário um número grande de amostras.

No Brasil, o ensaio utilizado para determinar o MR em solos e britas segue as diretrizes estabelecidas pelas normas DNIT 134/2018-ME e DNIT 181/2018-ME. No entanto, para uma compreensão mais aprofundada dos resultados desses ensaios, faz-se necessário desenvolver uma metodologia que empregue amostras compostas por materiais sintéticos com características conhecidas. Esse procedimento possibilita a automação dos equipamentos, visando evitar possíveis erros de leitura, uma vez que os dispositivos possuem tecnologias e componentes diversos. Por exemplo, a calibração dos corpos de prova compostos por material sintético nos equipamentos designados como A e B. Pretende-se analisar se há divergência nos resultados entre os equipamentos examinados. A hipótese deste trabalho é de que os valores de MR obtidos em dois equipamentos triaxiais dinâmicos distintos, mesmo com diferentes componentes e métodos de obtenção dos resultados de MR, apresentam módulos semelhantes.

MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio de determinação do Módulo de Resiliência (MR) permite analisar a deformação da amostra após a aplicação de tensões de desvio padronizadas a partir de diferentes aplicações de pulso de carga em curta duração. Essa deformação é dimensionada utilizando parâmetros numéricos e aplicada a modelos elásticos não lineares. A deformação resiliente (ε_r) é obtida por meio da deformação da amostra em relação ao posicionamento do transdutor de deslocamento e pode ser calculada pela Equação 1.

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_r}{H_0} \quad (1)$$

Em que (ε_r) é a deformação específica recuperável ou resiliente; δ_r é o deslocamento resiliente ou recuperável e; H_0 é a altura de referência do medidor de deslocamento (LVDT) em mm.

O MR pode ser obtido pela relação entre a tensão desvio aplicada (σ_d) e a deformação específica resiliente (ε_r) e é dado por meio da Equação 2.



DOI: 10.29327/1430212.49-14

ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA
ENTRE DIFERENTES EQUIPAMENTOS TRIAXIAIS COM MATERIAL SINTÉTICO

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2)$$

Onde M_R é o Módulo de Resiliência; σ_d corresponde à tensão desvio aplicada repetidamente e; ε_r é a deformação específica axial resiliente.

Normas para Ensaio de Módulo de Resiliência

No Brasil, o ensaio é regulamentado pelo DNIT 134/2018-ME para materiais não estabilizados quimicamente e pelo DNIT 181/2018-ME para materiais estabilizados quimicamente. A Tabela 1 destaca as características recomendadas por essas normas para os componentes do equipamento triaxial dinâmico.

Tabela 1. Recomendações das normas brasileiras para determinação do MR.

Componentes	DNIT 134/2018-ME	DNIT 181/2018-ME
Tipo de material	Materiais não estabilizados quimicamente.	Materiais estabilizados quimicamente.
Posicionamento LVDT	São fixos diametralmente na amostra, presos ao cabeçote superior e apoiados na alça ou posicionados no terço-médio.	São fixos na alça de suporte do corpo de prova, ou seja, lado de dentro da câmara, posicionado no terço-médio do corpo de prova.
Faixa de leitura	Leitura do deslocamento de 1×10^{-3} mm, com faixa de leitura de, no máximo, 0,5 mm.	Leitura do deslocamento de 1×10^{-3} mm, com faixa de leitura de, no máximo, 0,5 mm.
Quantidade de LVDT	2	2
Frequência exigida	1Hz (60 ciclos por minuto), que corresponde à duração do pulso de carga de 0,1s e 0,9s de repouso.	1Hz (60 ciclos por minuto), que corresponde à duração do pulso de carga de 0,1s e 0,9s de repouso.
Sistema de aplicação das tensões	Cilindro de pressão a ar comprimido com pistão de carga ou uso de prensa hidráulica com estrutura que permite a aplicação de cargas repetidas.	Cilindro de pressão a ar comprimido com pistão de carga ou uso de prensa hidráulica com estrutura que permite a aplicação de cargas repetidas.

Segundo a norma americana AASHTO T 307-99 (2021), o ensaio de MR é diferenciado pelo número de repetições da tensão desvio, duração e frequência do carregamento e níveis de carregamento. Já a norma britânica BS EN 13286-7 (2004) é utilizada para misturas não ligadas e ligadas hidráulicamente.

O modelo universal não-linear foi desenvolvido no projeto NCHRP 1-28A (AASHTO, 2014a) para caracterização do MR de materiais não tratados, sub-base e subleito. Este modelo foi atualizado com a inserção do *software* M-E PDG que faz parte do novo guia de dimensionamento da AASHTO, resultando-se na norma NCHRP 1-37A (AASHTO, 2014b). A Tabela 2 apresenta as características preconizadas pelas respectivas normas.

Componentes	AASHTO T 307-99 (2021)	BS EN 13 286-7 (2004)	NCHRP 1-28A (AASHTO, 2014A)
Tipo de material	Materiais não estabilizados quimicamente.	Classe dos materiais granulares com misturas não ligadas e ligadas hidráulicamente.	Materiais granulares não tratados, sub-base e subleito.



PRISCILA OLIVEIRA FOLLY,
CAMILA ANTUNES MARTINS,
LUIZA CARLA DE ALENCAR MENEZES,
ANTÔNIO CARLOS RODRIGUES GUIMARÃES

Posicionamento LVDT	São utilizados um par na vertical e um par na horizontal da amostra, fixados nas braçadeiras com grampos de comprimento medido na metade do diâmetro da amostra.	São utilizados três LVDT's para verificar as deformações axiais, fixados verticalmente a 120° (graus), medindo ao longo dos 100 mm centrais da amostra e, três para as deformações radiais, instalados horizontalmente a 120° na metade do corpo de prova.	São fixados um par de LVDT no topo e um par fixado junto as braçadeiras localizadas a 1/4 da amostra.
Faixa de leitura	Apresentam sensores mais precisos (extensômetro óptico e sensor sem contato), com linearidade, $\pm 0,25\%$ da escala total; repetibilidade, $\pm 1\%$ da escala total; sensibilidade mínima, 2mv/V (AC) ou 5mv/v (DC).	Faixa de leitura com 0,000015 polegada (0,00038 mm) de deformação vertical e horizontal.	Faixa de leitura com 0,000015 polegada (0,00038 mm) de deformação vertical e horizontal.
Quantidade de LVDT	4	6	4
Frequência exigida	Tensão axial cíclica é aplicada em 1 s (1Hz de frequência), sendo 0,1s de carga e 0,9s de repouso. O intervalo pode variar entre 0,9s até 3,1s.	Frequência de carregamento deve ser mantida entre 0,2Hz e 10Hz.	1Hz (60 ciclos por minuto), que corresponde à duração do pulso de carga de 0,1s e 0,9s de repouso e duração para materiais de base/sub-base é 0,2s duração seguida por um período de descanso de 0,8s duração para materiais de subleito.
Sistema de aplicação das tensões	Célula de carga eletrônica com capacidade para o carregamento máximo necessário e sensibilidade de 0,5%	A norma não deixa explícito qual o sistema de aplicação deve ser usado para as tensões no método A e no método B.	Cilindro de pressão a ar comprimido com pistão de carga. A célula de carga eletrônica localizada dentro da célula triaxial.

No procedimento para determinar o MR nos equipamentos, ambas as normas apresentam duas fases. Na primeira fase ocorre o condicionamento, visando reduzir as deformações plásticas. Já na segunda, são aplicados os pares de tensões confinante e desvio, predefinidos pelo método de ensaio e, simultaneamente, à aplicação das tensões são medidas às deformações específicas resilientes correspondentes (MOREIRA, 2022).

Os LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*), transdutores de deslocamento, apresentam características distintas conforme o equipamento utilizado, como, por exemplo, o posicionamento, que também é modificado conforme a norma empregada.

Outros fatores que alteram o resultado do módulo de resiliência em ensaios laboratoriais são: magnitude das tensões, razão de tensões principais (σ_1/σ_3), repetições da tensão desvio, histórico de tensões, duração e frequência da aplicação da tensão desvio, categoria de agregado, densidade e umidade da compactação, grau de saturação e número de aplicações de carga (LI e SELING, 1994).



DOI: [10.29327/1430212.49-14](https://doi.org/10.29327/1430212.49-14)

ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA
ENTRE DIFERENTES EQUIPAMENTOS TRIAXIAIS COM MATERIAL SINTÉTICO

Ainda, de acordo com Vianna (2002), outros dois fatores que apresentam grande relevância são a calibração dos equipamentos e o conhecimento adquirido pelo operador na utilização dos equipamentos.

Conceito estatístico para determinação do MR

O valor do MR é modelado pela função de regressão linear, onde é possível realizar a comparação entre duas ou mais variáveis por meio do diagrama de dispersão para verificar o melhor modelo de comportamento do módulo de resiliência. Esse modelo é caracterizado pelo coeficiente de determinação (R^2), o qual permite a identificação do melhor enquadramento. O R^2 , conhecido como correlação linear ou r de Pearson, refere-se ao nível de relação entre duas variáveis quantitativas, variando de -1 a 1. Sendo expresso pela Equação 3:

$$r_{xy} = \frac{\sum z_x z_y}{N} \quad (3)$$

Onde: r_{xy} – Coeficiente de Correlação; z_x – Desvio padrão da variável um; z_y – Desvio padrão da variável dois; N – Tamanho do conjunto de dados.

Quando o valor obtido de R^2 for igual a 0 significa que não há dependência linear entre as variáveis analisadas. Já no caso de obtenção de valores maiores do que zero, indica a existência de uma relação diretamente proporcional entre as variáveis. Dessa forma, à medida que o valor de uma variável aumenta, ocorre o mesmo com a outra variável. Contudo, quando são obtidos valores inferiores a zero, há uma relação inversamente proporcional entre as variáveis, ou seja, na medida que uma variável aumenta a outra diminui.

No que diz respeito aos materiais sintéticos utilizados na confecção dos corpos de prova de referência, estes apresentam alta rigidez e são caracterizados pelos resultados do coeficiente de variação, cujo objetivo é testar a repetibilidade e reprodutividade dos valores de MR (VIANNA, 2002; CLAROS *et al.*, 1990). O corpo de prova de lucite, analisado por Barksdale e Alba (1997), apresentou coeficiente de variação de 5,2% e 2,4%, respectivamente, ou seja, valores de MR homogêneos, independente da tensão aplicada de acordo com a norma do DNIT.

O conceito de coeficiente de variação, assim como o de desvio padrão, corresponde a uma medida de dispersão, contudo, despreza a influência da ordem de grandeza das variáveis, dado que, demonstrando o quão afastados da média encontram-se os dados, independentemente das unidades de medidas que as séries de dados estão. É dado pela Equação 4:

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} \quad (4)$$

Em que: CV – Coeficiente da variação; s – Desvio padrão; \bar{X} – Média aritmética.

Quanto maior for o coeficiente de variação, mais dispersos os dados estão em relação à média, e quanto menor o coeficiente, mais homogêneos os dados são. Usualmente, são adotadas as seguintes métricas para avaliar tal dispersão: $CV < 15\%$ - baixa dispersão (dados homogêneos); $15\% \leq CV \leq 30\%$ - média dispersão; e $CV > 30\%$ alta dispersão (dados heterogêneos).



METODOLOGIA

O diagrama a seguir (Figura 1) apresenta o planejamento dos experimentos realizados com material sintético, apresentando o critério de escolha do material e o procedimento experimental realizado.

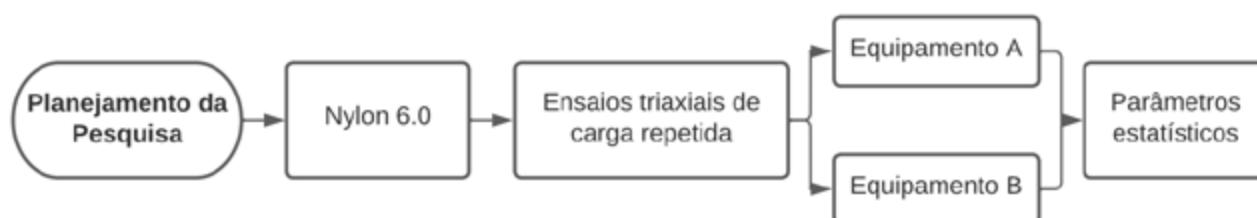


Figura 1. Estrutura experimental com material sintético.

O material sintético utilizado foi o nylon 6.0 em virtude de que este material apresenta propriedades físicas e mecânicas conhecidas, conforme procedimento proposto por Vianna (2002). Ainda de acordo com o autor, esse polímero apresentou o melhor comportamento no ensaio triaxial de carga repetida, levando em consideração o fundamento da repetibilidade e reprodutividade dos ensaios e, devido a isso, foi utilizado para verificar a acurácia nos resultados e a calibração do equipamento utilizado na época.

O procedimento para realização do ensaio triaxial dinâmico está descrito conforme a norma DNIT 134/2018-ME. Este método de ensaio foi realizado em triplicata em ambos os equipamentos. Utilizou-se um corpo de prova de material sintético de nylon 6.0 extrudado para realização dos ensaios, conhecido como poliamida, que é caracterizado por apresentar elevada resistência. Esse material é utilizado na fabricação de engrenagens, fios e tecidos. O corpo de prova apresenta diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, e está representado na Figura 2.



Figura 2. Amostra de nylon 6.0.

Quanto aos equipamentos utilizados neste estudo, foram adotados dois modelos de fabricação nacional, os quais são capazes de executar ensaios triaxiais dinâmicos e são compostos por diferentes acessórios, bem como distintas técnicas de operação. No presente estudo foram utilizados dois equipamentos triaxiais dinâmicos: o equipamento A (Figura 3) e equipamento B (Figura 4), ambos de fabricação nacional, porém com distintos acessórios e técnicas de operação. Os equipamentos apresentam como principal diferença o posicionamento dos LVDTs.



DOI: 10.29327/1430212.49-14

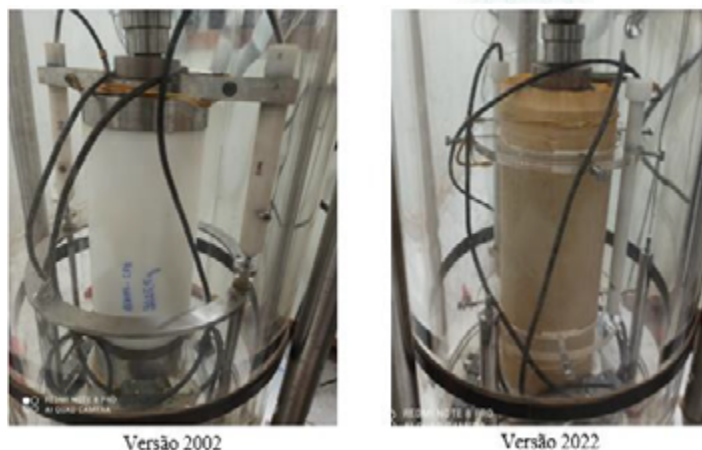
ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA
ENTRE DIFERENTES EQUIPAMENTOS TRIAXIAIS COM MATERIAL SINTÉTICO

Figura 3. Equipamento triaxial dinâmico A.

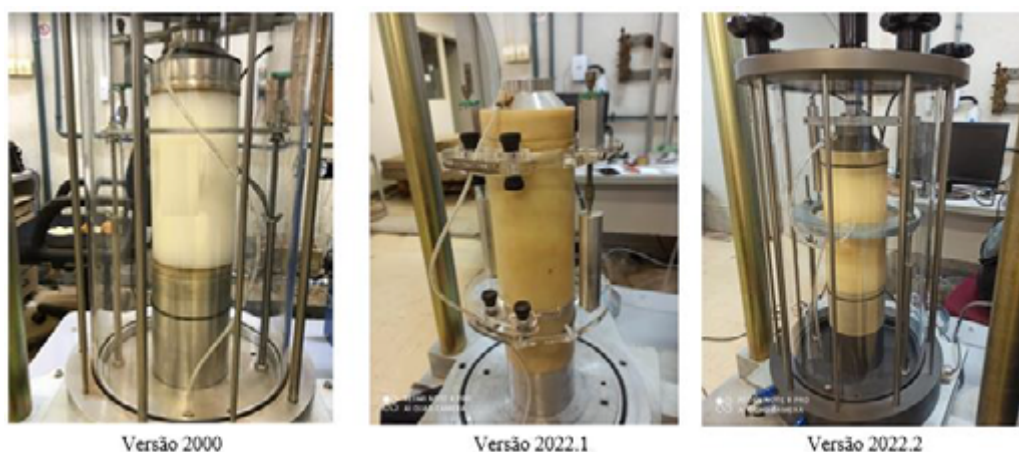


Figura 4. Equipamento triaxial dinâmico B.

São apresentadas, nas Tabelas 3 e 4, as características dos dois equipamentos citados, conforme descrito nos manuais dos fabricantes, onde é possível verificar o posicionamento e a resolução de precisão dos sensores utilizados para medição da deformação elástica do material.

Tabela 3. Características dos Equipamentos Triaxiais – Equipamento A.

CARACTERÍSTICAS	Equipamento A – Versão 2002	Equipamento A – Versão 2022
Fonte de alimentação	110 volts AC	110 volts AC
Fabricação	Nacional	Nacional
Tipo de ensaio realizado pelo equipamento	Triaxial dinâmico e estático	Triaxial dinâmico e estático
Programa de leitura dos resultados	SCTRI1	SCTRI1
Dimensões do corpo de prova	Diâmetro de 100 mm x 200 mm de altura.	Diâmetro de 100 mm x 200 mm de altura.
Posicionamento do LVDT	Utiliza TR1 e TR2, na parte superior da amostra. Precisão: AY111HN, 0.2 IN, AC-AC ultra precision.	Utiliza TR1 e TR2, posicionados a 0,172mm da parte superior e inferior da amostra. Precisão:



PRISCILA OLIVEIRA FOLLY,
CAMILA ANTUNES MARTINS,
LUIZA CARLA DE ALENCAR MENEZES,
ANTÔNIO CARLOS RODRIGUES GUIMARÃES

	AY111HN, 0.2 IN, AC-AC ultra precision.	
Frequência do ensaio	1Hz e 2Hz	1Hz e 2Hz
Aplicação das tensões	Tensão confinante aplicada pelo ar comprimido e a tensão desvio pelo pistão pneumático.	Tensão confinante aplicada pelo ar comprimido e a tensão desvio pelo pistão pneumático.

Tabela 4. Características dos Equipamentos Triaxiais – Equipamento B.

CARACTERÍSTICAS	Equipamento B – Versão 2000	Equipamento B – Versão 2022
Fonte de alimentação	220 volts AC	220 volts AC
Fabricação	Nacional	Nacional
Tipo de ensaio realizado pelo equipamento	Triaxial dinâmico. possível realizar ensaio das normas DNIT 134/2018-ME, DNIT 181/2018-ME, DNIT 179/2018-IE.	Triaxial dinâmico. possível realizar ensaio das normas DNIT 134/2018-ME, DNIT 181/2018-ME, DNIT 179/2018-IE.
Programa de leitura dos resultados	Interface homem-máquina (IHM) touchscreen 7”.	Interface homem-máquina (IHM) touchscreen 7”.
Dimensões do corpo de prova	Diâmetro de 100 mm x 200 mm de altura.	Diâmetro de 100 mm x 200 mm de altura.
Posicionamento do LVDT	Utiliza TR1 e TR2 com resolução de medição de 0,001mm, fixados na parte superior da amostra, com a alça presa na amostra.	Utiliza TR1 e TR2 com resolução de medição de 0,001mm, fixados na parte superior da amostra, medindo o terço médio.
Frequência do ensaio	1Hz	1Hz
Aplicação das tensões	Tensão confinante com ar comprimido e o atuador pneumático aplica a célula de carga.	Tensão confinante com ar comprimido o atuador pneumático aplica a célula de carga.

As Tabelas 3 e 4, evidenciam as diferenças de especificações dos dois equipamentos, sendo equipamento A e equipamento B. Percebe-se, dessa forma, a significativa influência da calibração e do mecanismo de operação de cada equipamento na obtenção dos resultados. O equipamento A, mesmo na versão 2022, encontra-se com especificações distintas da norma DNIT 134/2018-ME, quando especifica a necessidade de instalação da faixa de medição dos LVDTs no terço médio da amostra.

Inicialmente foi conduzida uma fase de condicionamento da amostra nos equipamentos. Nesta etapa, uma sequência de cargas foi aplicada para mitigar a influência das deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações da tensão de desvio, seguindo o mesmo procedimento empregado em solos. A ausência de condicionamento pode resultar em interferências nas medições do módulo de resiliência devido a essas deformações. No ensaio triaxial com nylon 6.0, a frequência adotada para a aplicação das cargas repetidas é de 1 Hz (60 ciclos por minuto), com cada ciclo tendo uma duração de 1 segundo, dos quais 0,10 são dedicados à aplicação e 0,9 ao repouso, conforme estabelecido pelo DNIT 134/2018-ME.

DOI: [10.29327/1430212.49-14](https://doi.org/10.29327/1430212.49-14)ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA
ENTRE DIFERENTES EQUIPAMENTOS TRIAXIAIS COM MATERIAL SINTÉTICO

Os dados obtidos foram analisados utilizando parâmetros estatísticos, como o coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de variação (CV), a fim de observar a dispersão dos resultados de MR obtidos em cada equipamento avaliado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de Módulo de Resiliência (MR) obtidos para os dos materiais sintéticos, conforme estudo de Vianna (2002), geralmente variam entre 3.200 MPa a 4.000 MPa no equipamento A (Tabela 5) e entre 98 e 433 MPa no equipamento B.

Tabela 5. Resultado do módulo de resiliência no Equipamento A.

	Teste 1 Nylon	Teste 2 Nylon	Teste 3 Nylon
MR máx(MPa)	4.301,00	3.607,00	4.482,00
MR mín(MPa)	3.152,00	2.912,00	2.612,00
MR médio (MPa)	3.963,28	3.188,11	4.002,72
Desvio padrão	304,54	153,92	432,55
Coef. de variação	7,7%	4,8%	10,8%

Tabela 6. Resultado do módulo de resiliência no Equipamento B.

	Teste 1 Nylon	Teste 2 Nylon	Teste 3 Nylon
MR máx(MPa)	967,00	766,00	194,00
MR mín(MPa)	144,00	197,00	46,00
MR médio (MPa)	411,17	432,17	97,56
Desvio padrão	226,07	190,34	42,59
Coef de variação	55,0%	44,0%	43,7%

Os valores de módulo de resiliência dos materiais sintéticos estudados por Vianna (2002) situaram-se entre 1.000 MPa e 2.000 MPa. No entanto, cabe salientar que os equipamentos utilizados neste estudo foram atualizados com componentes mais sofisticados, como posicionamento do LVDT e aplicação de tensão com pistão pneumático, o que pode justificar essa divergência nos resultados.

Os resultados de MR no equipamento A resultou em valores duas vezes maior que à referência de Vianna (2002), enquanto o equipamento B, resultou em valores de um quarto. De acordo com Vianna (2002), o Nylon 6.0 possui propriedades mecânicas específicas, como um módulo de elasticidade à compressão de 1.800 MPa (ASTM D695) e uma dureza Rockwell de R100 (ASTM D785 / ISO 2039-2). Isso confirma que os valores fornecidos pelo equipamento A correspondem à dureza do material, enquanto os resultados do equipamento B estão inconsistentes com a rigidez aparente do material.

Essa disparidade entre os resultados dos equipamentos pode ser atribuída à variação no posicionamento e sensibilidade dos LVDTs. Assim, verifica-se que é imprescindível desenvolver um plano de automação e calibração dos equipamentos para avaliar e padronizar os resultados independentemente do equipamento utilizado.

Para melhor entendimento da comparação entre os valores de MR foi utilizado o conceito de coeficiente de variação, que busca por meio do desvio padrão amostral e a média do MR para verificar a dispersão entre os dados. Na Tabela 5 é possível verificar a homogeneidade dos resultados que apresentaram variação de 4,8% a 10,8%, ou seja, representam a uniformidade entre os valores no



PRISCILA OLIVEIRA FOLLY,
 CAMILA ANTUNES MARTINS,
 LUISA CARLA DE ALENCAR MENEZES,
 ANTÔNIO CARLOS RODRIGUES GUIMARÃES

equipamento A. E a Tabela 6 representa os valores do equipamento B, com variação de 44% a 55%, apresentando heterogeneidade de dados.

As Figuras 5 e 6 apresentam a correlação entre as tensões confinantes e de desvio, bem como os resultados de MR.

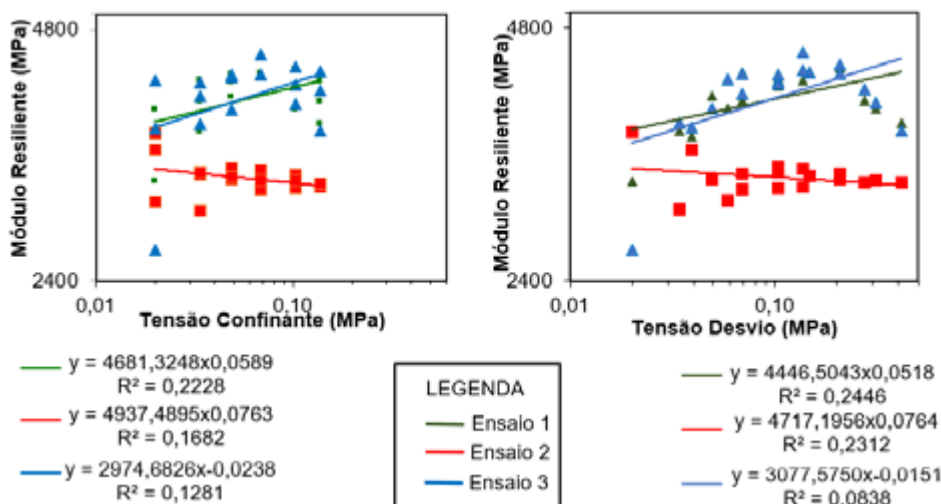


Figura 5. Correlação das tensões e MR no equipamento A.

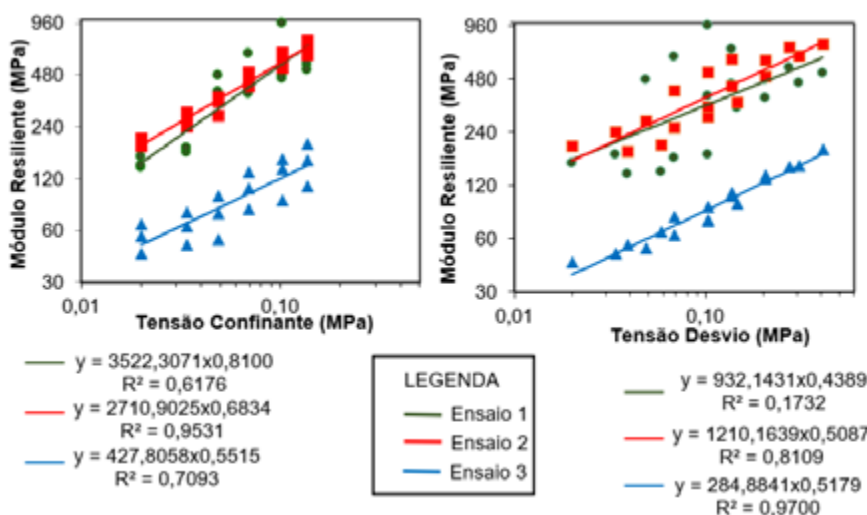


Figura 6. Correlação das tensões e MR no equipamento B.

Ao analisar os valores de R² obtidos pela correlação entre as tensões confinantes e de desvio e os resultados de MR (Figura 5), observa-se que, ao aumentar a tensão de desvio, o módulo de resiliência não apresenta variações significativas no equipamento A. Isso indica a uniformidade da amostra, sendo que valores de R² mais próximos de zero são considerados mais adequados. Portanto, é coerente que o R² seja baixo. Por outro lado, o equipamento B (Figura 6) apresentou valores de R² próximos de 1, o que indica um erro de sensibilidade nos sensores, conforme mencionado anteriormente, e esse efeito foi observado devido à alta rigidez do material sintético.



DOI: [10.29327/1430212.49-14](https://doi.org/10.29327/1430212.49-14)

ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA
ENTRE DIFERENTES EQUIPAMENTOS TRIAXIAIS COM MATERIAL SINTÉTICO

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos resultados dos ensaios de módulo de resiliência nos equipamentos A e B, constatou-se uma diferença significativa. No equipamento A, o coeficiente de determinação se aproximou mais de zero, indicando que as tensões aplicadas à categoria de solos interferem pouco na rigidez do nylon 6.0, resultando em pouca variação entre os valores de MR. Por outro lado, no equipamento B, o valor de R^2 se aproximou de 1, o que não é satisfatório, pois os resultados de MR não correspondem adequadamente às propriedades do material ensaiado.

Outro conceito estatístico utilizado para avaliar a dispersão dos resultados de MR foi o coeficiente de variação, que apresentou menos de 15% de dispersão, indicando dados homogêneos para o equipamento A, independentemente do estado de tensão. Isso representa a alta resistência da amostra de material sintético.

A partir dessas análises, foi possível observar que o material sintético apresentou valores distintos para os resultados do módulo de resiliência nos equipamentos A e B. No entanto, conclui-se que o posicionamento e a sensibilidade dos sensores para medir as deformações, assim como o método de aplicação das tensões de cada equipamento, são de grande importância para analisar os resultados.

Essa discrepância de comportamento pode estar relacionada às peculiaridades de cada equipamento, tais como o posicionamento dos LVDTs, onde no equipamento A são posicionados no terço médio da amostra, presos por uma alça com distância de 0,712 mm da base e do topo, enquanto no equipamento B, estes verificam as deformações elásticas na amostra desde o topo até a pedra porosa, fixados no top cap, sem contato direto. Assim, conclui-se que os equipamentos necessitam de uma padronização do posicionamento dos LVDTs e do método de aplicação das tensões.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo suporte fornecido para a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAASHTO T 307-99. Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. Washington, DC: [s.n.], 2021.
- BARKSDALE, R.D.; ALBA, J., 1997. Laboratory Determination of resilient Modulus for Flexible Pavement Design. Final Report prepared for National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Research Council.
- BATHURST, R. J.; RAYMOND, G. P. Geogrid reinforcement of ballasted track. Transportation Research Board, v. 1, n. 1153, p. 8–14, 1987.
- BS EN 13286-7 (2004). Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. CEN.
- CLAROS, G.; HUDSON, W.R.; STOKOE II, K.H., 1990. Modifications to Resilient Modulus Testing Procedure and Use of Synthetic Samples for Equipment Calibration. TRR 1278.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 181 ME: Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2018.



PRISCILA OLIVEIRA FOLLY,
CAMILA ANTUNES MARTINS,
LUISA CARLA DE ALENCAR MENEZES,
ANTÔNIO CARLOS RODRIGUES GUIMARÃES

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 134 ME: Pavimentação – Solos: Determinação do Módulo de Resiliência - Método de Ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2018.
- FERREIRA, J. G. H. M. Tratamento de Dados Geotécnicos Para Predição de Módulos de Resiliência de Solos e Britas Utilizando Ferramentas de Data Mining. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.
- GOMES, M. S.; HELAL, A. M. P.; FILHO, J. C. Análise do comportamento mecânico de um pavimento ferroviário através de um estudo comparativo entre os ensaios de CBR e módulo de resiliência. Periódico do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da UNDB. N. 3, v. 1, 2015.
- GUIMARÃES, A. C. R. Estudo de deformação permanente em solos e teoria do shakedown aplicada a pavimentos flexíveis. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- INDRATATNA, B.; SALIM, W.; RUJKIATKAMJORN, C. Advanced rail geotechnolog y ballasted track. [S.l.]: CRC press, 2011.
- LI, D.; SELING, E. T. Resilient modulus for fine grained subgrade soils. Asce, v. 120, n. 6, p.939-957. 1994.
- MINISTÉRIO DA DEFESA. CENTRO DE EXCELÊNCIA EM ENGENHARIA DOS TRANSPORTES. MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES: Plano Nacional de Logística e Transporte Relatório. Brasília, 2018.
- MOREIRA, C. R. C. L. A. Módulo de Resiliência de Solos Arenosos Finos Lateríticos do Estado de São Paulo Determinado por meio do Ensaio Triaxial Cíclico. São Paulo, 2022.
- NCHRP 1-28A. Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design. National Cooperative Highway Research Program Research Results Digest Nº. 285. 2004.
- NCHRP 1-37A. Summary of the 2000, 2001, and 2002. AASHTO guide for the design of new and rehabilitated pavement structures. National Cooperative Highway Research Program Research. 2004.
- VIANNA, A. A. D. Contribuição para o Estabelecimento de um Material Padrão e de Metodologia para Calibração de Equipamentos de Ensaio Dinâmicos. Dissertação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, 2002.



IMPACTO ECONÔMICO NA PAVIMENTAÇÃO QUANDO DA ANÁLISE MECANÍSTICA-EMPÍRICA CONSIDERANDO MÓDULOS DE RESILIÊNCIA TEÓRICOS E OBTIDOS POR ENSAIOS

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Gisandra Faria de Paula¹; Paulo Costa Fernandes²; Mateus Ribeiro Caetano³; Rafael Cerqueira Silva⁴; Vítor do Nascimento e Silva⁵; Josiene Chrystina Ribeiro Cardoso⁶; Fábio Zanchetta⁷

RESUMO

Pavimentos flexíveis são sistemas complexos formados por materiais com características intrinsecamente heterogêneas, que se comportam como meios elastoplásticos. Dada a importância de se compreender o comportamento mecânico das camadas que compõem um pavimento frente às solicitações, foi realizada uma análise econômica a partir de resultados de análises mecanística-empíricas, de uma obra de pavimentação no Distrito Federal, considerando módulos de resiliência (MR) dos materiais obtidos por ensaios laboratoriais e por faixas de valores indicados na literatura (valores teóricos). Dentre os cenários analisados, observou-se que a estrutura do pavimento poderia ser otimizada utilizando MR obtidos por ensaios. Das soluções possíveis, a espessura do revestimento asfáltico poderia ser reduzida em 1cm, ou em 2cm, se aumentasse a espessura da base em 3cm. Assim, utilizando-se os MR de laboratório, haveria uma redução no preço da obra em torno de R\$ 670 mil. Esta economia, obtida em uma única obra, sendo revertida na compra de mais equipamentos triaxiais dinâmicos e acessórios, garantiria atendimento à demanda de ensaios das frentes de obras projetadas para o DF. As análises dos pavimentos projetados dependem destes ensaios, cujos procedimentos requerem muito tempo, sendo, portanto, importante ter uma estrutura laboratorial com capacidade de produção compatível com os prazos de entrega dos projetos. Desta forma, mostrou-se que o investimento em tecnologia de ensaios promove maior conhecimento sobre o comportamento dos materiais, auxiliando nas tomadas de decisão sobre alternativas de solução para a vida útil prevista para o pavimento. Além da economia, destaca-se a viabilidade sob a perspectiva da sustentabilidade, tendo em vista redução de material e de esforços de máquinas.

PALAVRAS-CHAVE: Dimensionamento de pavimento, módulo de resiliência, ensaio triaxial.

ABSTRACT

Flexible pavements are complex systems formed by materials with intrinsically heterogeneous characteristics, which behave like elastoplastic media. Given the importance of understanding the mechanical behavior of the layers that make up a pavement in response to loads, an economic analysis was carried out based on the results of mechanistic-empirical analyzes of a paving project in the Federal District, considering resilience modules (MR) of materials obtained by laboratory tests and by ranges of values indicated in the literature (theoretical values). Among the scenarios analyzed, it was observed that the pavement structure could be optimized using MR obtained through tests. Of the possible solutions, the thickness of the asphalt coating could be reduced by 1cm, or by 2cm, if the base thickness was increased by 3cm. Thus, using laboratory MR, there would be a reduction in the price of the work of around R\$670 thousand. This savings, obtained in a single project, being reversed in the purchase of more dynamic triaxial equipment and accessories, would guarantee compliance with the demand for testing the work fronts designed for the DF. The analyzes of designed pavements depend on these tests, the procedures of which require a lot of time, and it is therefore important to have a laboratory structure with production capacity compatible with project delivery deadlines. In this way, it was shown that investment in testing technology promotes greater knowledge about the behavior of materials, helping in decision-making about alternative solutions for the expected useful life of the pavement. In addition to the economy, viability stands out from the perspective of sustainability, with a view to reducing material and machine efforts.

KEY WORDS: Pavement design, resilient modulus, triaxial tests.

^{1, 2} Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF): SAM Bloco C, Setor Complementares, Ed. Sede



PAULO COSTA FERNANDES,
 GISANDRA FARIA DEPAULA, MATEUS RIBEIRO CAETANO,
 RAFAEL CERQUEIRA SILVA, VÍTOR DO NASCIMENTO E SILVA,
 JOSIENE CHRYSTINA RIBEIRO CARDOSO, FÁBIOZANCHETTA

do DER/DF, CEP 70.620-030, Brasília, DF, Brasil, gisandra.paula@der.df.gov.br; paulo.fernandes@der.df.gov.br
 3, 4, 5, 6, 7 Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF, Brasil, mateusribeirocaetano@gmail.com; rafael.silva@unb.br;
 vitornascimentoesilva@gmail.com; josychrystina@gmail.com; fabio.zanchetta@unb.br

INTRODUÇÃO

Uma estrutura de pavimento constitui um conjunto de camadas interdependentes, onde as forças são transmitidas através da superfície de contato entre camadas, dissipando-se à medida que se aprofundam (do revestimento até o subleito). Os esforços, por sua vez, geram deformações elásticas (resilientes) e plásticas (permanentes), cuja magnitude dependerá da resistência e deformabilidade dos materiais que compõem as camadas. Os elementos da estrutura são construídos sobre a fundação, que é o solo ou subleito da fundação (Figura 1).

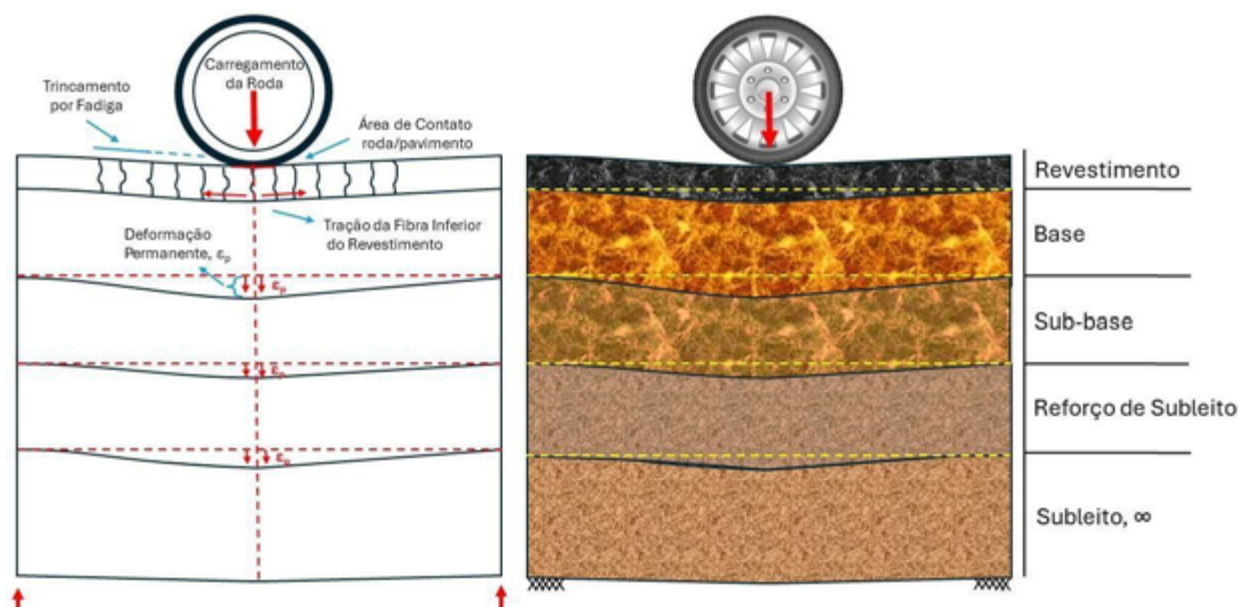


Figura 1. Estrutura de pavimento flexível.

Sendo o pavimento uma estrutura, é possível determinar o comportamento tensão *versus* deformação em função das solicitações, por meio da teoria da elasticidade aplicada aos modelos de camadas, e, assim, definir as propriedades resilientes e permanentes dos elementos ou camadas da estrutura, para garantir a serventia do pavimento durante sua vida útil. Este procedimento é denominado de análise estrutural de pavimentos, mecânica dos pavimentos ou reologia dos materiais aplicada em pavimentos.

Aliado com a evolução da frota de veículos (principalmente caminhões e ônibus) e o consequente aumento de eixos e carga por eixo, o dimensionamento pelo método DNER (1981) tornou-se inviável para a prática de projetos de pavimentos flexíveis no país, por subdimensionar estruturas de pavimento em que o número N de projeto seja muito elevado ($N > 10^7$), e os fatores de equivalência de cargas (FEC's) que sofreram, desde a implantação do método, alterações limites de peso (para maior) propostas em projetos de lei do Congresso Nacional, mas que não reproduziram os mesmos efeitos de FEC's no método (FERNANDES JÚNIOR, 1994; INOUE; FERNANDES JUNIOR, 2023).



DOI: [10.29327/1430212.49-9](https://doi.org/10.29327/1430212.49-9)

IMPACTO ECONÔMICO NA PAVIMENTAÇÃO QUANDO DA ANÁLISE MECANÍSTICA-EMPÍRICA CONSIDERANDO MÓDULOS DE RESILIÊNCIA TEÓRICOS E OBTIDOS POR ENSAIOS

Ademais, o método DNER (1981), de caráter puramente empírico, não considera o comportamento geotécnico de materiais constituintes de cada camada da estrutura deste sistema, frente às ações de tensões e deformações impostas pelo tráfego e os efeitos das condições ambientais e de drenagem – base da análise mecanística (PAULA; FERNANDES; SILVA, 2022).

No Brasil, desde a primeira década de 2000, a análise mecanística é considerada conjuntamente com o dimensionamento empírico vigente no país para pavimentos flexíveis (DNIT, 2006). E, em 2018, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), lançou o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), um novo método de dimensionamento, de caráter mecanístico-empírico, representando um grande avanço para a realização de projetos de pavimentação/restauração no país (IS-247).

Percebe-se, desta maneira, a preocupação do DNIT, há décadas, com as limitações do método DNER e a necessidade da aplicação de análises mecanísticas com a finalidade de prever o comportamento mecânico das estruturas de pavimento de uma forma mais racional e viável para a elaboração de projetos que resultem em um aumento da vida útil dessas estruturas em função do carregamento e resistência dos materiais a serem utilizados no projeto.

Para projetar um pavimento com considerações mecanísticas, são estudados os materiais, o tráfego e as condições ambientais e de drenagem. Por meio da aplicação de um processo de cálculo específico, são definidas as espessuras das camadas dos materiais disponíveis no local, se necessário das melhorias nas propriedades, com a expectativa de que seja resistente e tenha qualidade de rolamento aos veículos conforme previsto para o período de vida útil.

Para os materiais granulares, verifica-se o comportamento elástico, por meio de ensaios laboratoriais de módulo de resiliência (MR) e plástico, por meio de ensaios de deformação permanente (DP). Para o concreto asfáltico, são realizados ensaios de MR, curva de fadiga e *flow number* (DP). Todos estes ensaios são realizados em equipamentos triaxiais e uniaxiais de carregamento dinâmicos.

Com os resultados obtidos, é possível dimensionar a estrutura de pavimento de forma mais adequada ao seu desempenho, reduzindo a parcela de empirismo vigente quando se dimensiona o pavimento utilizando dados existentes em especificações técnicas de MR (DNIT, 2006; IP-08/2004; IP-DE- P00/001), que, por vezes, podem não refletir a realidade dos materiais disponíveis nas proximidades da obra a ser implantada.

Neste contexto da mecânica dos pavimentos e visando analisar o comportamento estrutural das camadas que compõem o pavimento a partir de dados de MR obtidos em ensaios, o presente estudo de caso apresenta uma análise comparativa de dimensionamentos de pavimento flexível, tendo como referência um projeto executado com base em MR obtidos por dados normativos e laboratoriais (ensaios triaxiais e uniaxiais de carregamento dinâmico). Outros dados, como deformação permanente (DP) dos materiais das camadas de solo e material britado, bem como fadiga e *flow number* da camada de concreto asfáltico não foram considerados.

DADOS DE PROJETO

O dimensionamento refere-se às pistas de acesso de um viaduto compreendido entre a rodovia distrital DF-003 (EPIA) e via de acesso ao Setor Noroeste (Figura 3), com 5,2 km de extensão total, pertencente ao Sistema Rodoviário do Distrito Federal (SRDF) e sob a circunscrição do Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF). O número de repetições equivalentes às solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2 toneladas durante o período considerado de vida útil de projeto (10 anos) é $5,96 \times 10^7$, com taxa de crescimento anual de 4,74%.



PAULO COSTA FERNANDES,
 GISANDRA FARIA DEPAULA, MATEUS RIBEIRO CAETANO,
 RAFAEL CERQUEIRA SILVA, VÍTOR DO NASCIMENTO E SILVA,
 JOSIENE CHRYSTINA RIBEIRO CARDOSO, FÁBIOZANCHETTA

A estrutura de pavimento do projeto é apresentada na Figura 2. Para esta estrutura, foram consideradas as premissas de projeto elencadas nas Tabelas 1 e 2.



Figura 2. Estrutura de pavimento do projeto (DER-DF, 2022).

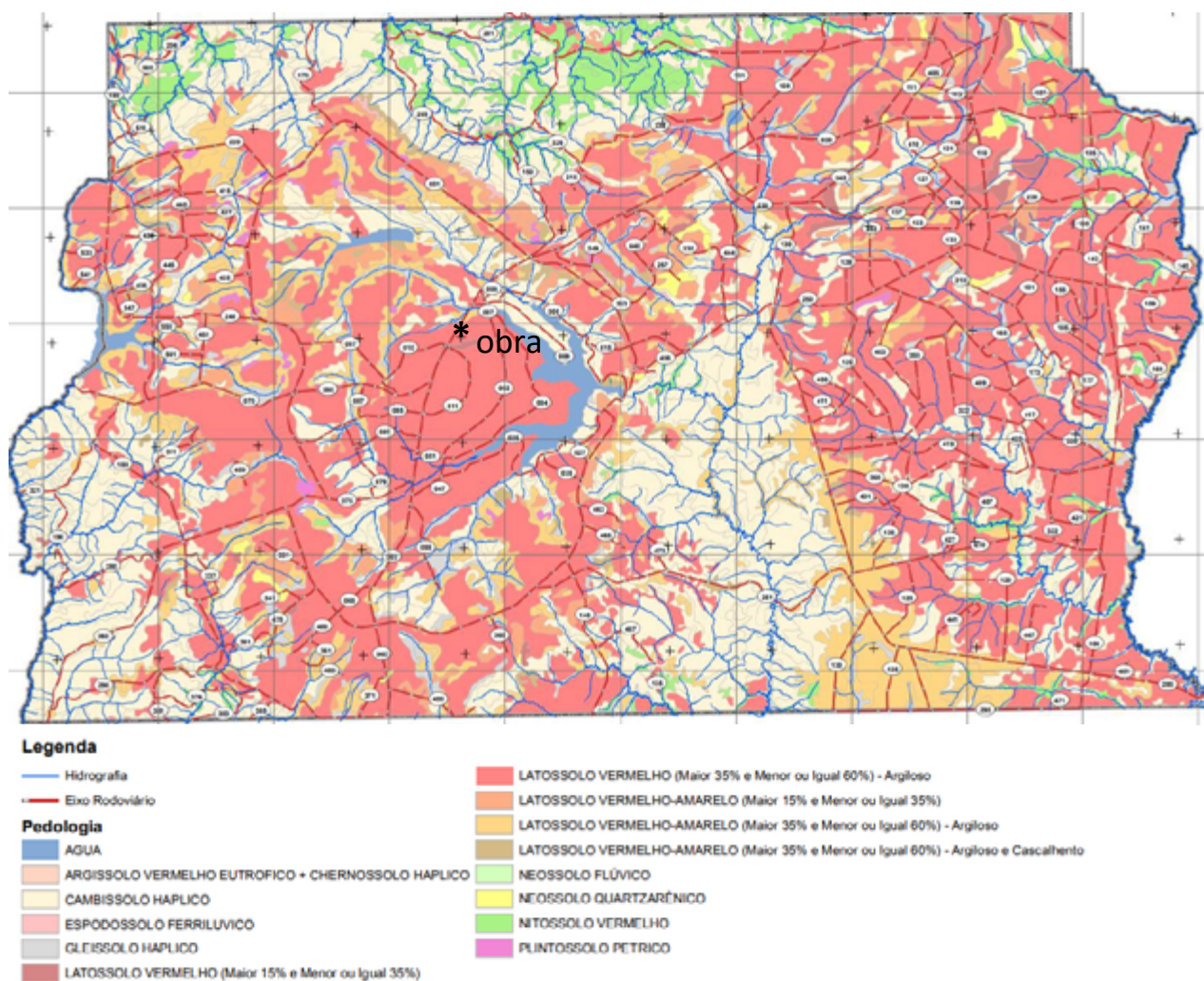


Figura 3. Localização do trecho em estudo, no mapa pedológico do DF (DER-DF, 2015).



DOI: 10.29327/1430212.49-9

IMPACTO ECONÔMICO NA PAVIMENTAÇÃO QUANDO DA ANÁLISE MECANÍSTICA-EMPÍRICA
CONSIDERANDO MÓDULOS DE RESILIÊNCIA TEÓRICOS E OBTIDOS POR ENSAIOS

Tabela 1. Dados gerais do carregamento imposto ao pavimento (DER-DF, 2022).

Propriedade	Magnitude
Pressão de contato pneu/pavimento	5,6 kgf/cm ²
Raio da área de contato pneu/pavimento	10,8 cm
Carga por roda	2.050 kgf
Afastamento entre pneus, por roda	28,8 cm
Ponto médio entre pneus	14,4 cm

Tabela 2. Valores usuais de Módulo de Resiliência e *Poisson* adotados (DER-DF, 2022).

Camada	Tipo	Norma	Módulo de Resiliência		<i>Poisson</i>	CBR (%)
			Estimativa (MPa)	Valor adotado (MPa)		
Revestimento (1)	CAUQ	IP-08/2004	3.000 < E < 5.000	5.000	0,30	
		IP-DE-P00/001	2.000 < E < 5.000			
Base (2)	BGS	IP-08/2004	100 < EB < 500	260	0,35	100
		IP-DE-P00/001	150 < EB < 300			
Sub-base	Solo + 4% cal	IP-08/2004	$E_{REF} = 18,0 \times (CBR_{SB})^{0,64}$ $\times \sqrt{3 \times CBR_{SL} / CBR_{SB}}$	168	0,20	20
		IP-DE-P00/001	150 < EB < 300			
Subleito	Solo laterítico (LG')	IP-08/2004	$E_{SL} = 22,0 \times (CBR)^{0,8}$	65	0,40	5
		IP-DE-P00/001	25 < EB < 75			

(1) Adotou-se o limite superior, considerando relevante o emprego de material especial como, por exemplo, o emprego de **asfalto-polímero**, na camada de rolamento, em face da severidade das solicitações provenientes do tráfego;

(2) Adotou-se como referência a média entre os valores intermediários da IP-08/2004 e IP-DE-P00/001.

Para a verificação do deslocamento vertical na superfície do pavimento (D_0), deformação específica horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento (ϵ_t) e deformação específica vertical de compressão no topo do subleito (ϵ_v), utilizaram-se os dados apresentados na Tabela 3 e exemplificados na Figura 4. A verificação mecanicista da estrutura de projeto foi realizada por meio do *software* Elsym5.

Tabela 3. Pontos de interesse da análise mecanística (DER-DF, 2022).

Propriedade	Parâmetro	Localização
Deslocamento vertical na superfície do pavimento (D_0)	U_z (cm)	Infinitesimal abaixo da carga (0,01 cm)
Deformação específica horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento (ϵ_t)	Maior valor entre ϵ_{xx} e ϵ_{yy}	Infinitesimal acima da interface CAUQ-base
Deformação específica vertical de compressão no topo do subleito (ϵ_v)	ϵ_{zz}	Infinitesimal abaixo da sub-base



PAULO COSTA FERNANDES,
GISANDRA FARIA DEPAULA, MATEUS RIBEIRO CAETANO,
RAFAEL CERQUEIRA SILVA, VÍTOR DO NASCIMENTO E SILVA,
JOSIENE CHRYSTINA RIBEIRO CARDOSO, FÁBIOZANCHETTA

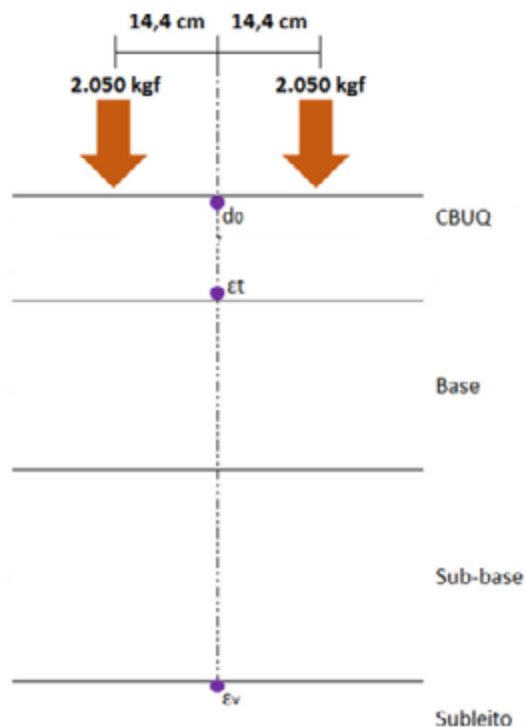


Figura 4. Exemplificação dos pontos de obtenção dos dados de interesse (DER-DF, 2022).

Os modelos adotados de deslocamento vertical (D_0), deformação específica horizontal de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t), responsável pelo trincamento do revestimento asfáltico (fadiga) e deformação específica vertical de compressão no topo do subleito (ϵ_v), responsável pelo afundamento em trilha de roda, estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Modelos adotados para verificação mecanicista (DER-DF, 2022).

Modelo	Equação	k	n	Valor admissível
DNER-PRO 011/79	$\log D_{adm} = k - n \cdot \log N$	3,01	0,174	$45,41 \times 10^{-2} \text{ mm}$
Pinto & Preussler (1980)	$N_{AASHTO}^{(1)} = k \cdot (1/\epsilon_t)^n$	$2,85 \times 10^{-7}$	3,69	$1,99 \times 10^{-4}$
Dormon & Metcalf (1965)	$N_{USACE} = k \cdot (1/\epsilon_v)^n$	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762	$2,70 \times 10^{-4}$

⁽¹⁾ N_{AASHTO} de projeto = $1,29 \times 10^7$.

ENSAIOS LABORATORIAIS

Em relação à consideração mecanística para ensaios dos materiais utilizados na estrutura de pavimento, foram realizados ensaios para determinação dos módulos de resiliência dos materiais granulares, em equipamento triaxial dinâmico de cargas repetidas, conforme normas do DNIT 134/2018-ME. Para o CAUQ, o ensaio de módulo de resiliência foi feito de acordo com a norma do DNIT 135/2018-ME, em equipamento de módulo dinâmico para misturas asfálticas, ambos existentes no DER-DF (Figura 5).

Destaca-se que os resultados obtidos para a brita graduada simples (BGS) foram extraídos do estudo de Caetano (2024), que verificou os comportamentos de MR e DP das principais jazidas comerciais de BGS existentes no DF, tendo os ensaios sido realizados no laboratório do DER-DF.



DOI: 10.29327/1430212.49-9

IMPACTO ECONÔMICO NA PAVIMENTAÇÃO QUANDO DA ANÁLISE MECANÍSTICA-EMPÍRICA
CONSIDERANDO MÓDULOS DE RESILIÊNCIA TEÓRICOS E OBTIDOS POR ENSAIOS

Figura 5. Equipamentos triaxiais dinâmicos do DER-DF: (a) solos e (b) misturas asfálticas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios triaxiais realizados encontram-se na Tabela 5. Com estes dados, o comportamento mecânico da estrutura em termos de rigidez foi verificado no *software* AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), que constitui a ferramenta de verificação de tensões, deformações e deslocamentos proposta pelo MeDiNa, usando a teoria de múltiplas camadas elásticas. A análise foi realizada considerando comportamento linear do MR, no qual se adotou a média de todos os módulos obtidos em cada sequência de tensões utilizada para determinação do MR (DNIT 134/2018-ME), e todas as camadas aderidas (1), tendo em vista que o *software* Elsym5, utilizado para a estrutura de projeto, realiza análises somente com esta condição.

Tabela 5. Parâmetros obtidos em ensaios para os materiais das camadas do pavimento.

Material	MCT	Módulo de Resiliência						
		Linear (MPa)			Não Linear			
		Mín	Médio	Máx	Coeficientes de Regressão			R ²
	k_1	k_2	k_3					
Subleito	LG'	223,59	224,20	224,21	335,79	0,15490	-0,03706	0,70300
Sub-base	LG'	284,72	408,00	519,19	1211,42	0,40658	-0,01944	0,96300
Base ⁽¹⁾	--	173,75	301,9	565,53	1336,563	0,369	0,239	0,98200
Revestimento ⁽²⁾	--	5.000	6.000	7.000			--	

⁽¹⁾ Caetano (2024).⁽²⁾ CAUQ com polímero.



PAULO COSTA FERNANDES,
GISANDRA FARIA DEPAULA, MATEUS RIBEIRO CAETANO,
RAFAEL CERQUEIRA SILVA, VÍTOR DO NASCIMENTO E SILVA,
JOSIENE CHRYSTINA RIBEIRO CARDOSO, FÁBIOZANCHETTA

Ressalta-se que não foi feito um dimensionamento da estrutura no MeDiNa, mas somente a análise das tensões e deformações da estrutura do pavimento considerando as propriedades de rigidez de cada material.

Verifica-se, para a camada de subleito, que o valor de $MR_{\text{médio}}$ obtido encontra-se satisfatório, até superior se comparado com amostras de mesma pedologia (latossolo) e classificação MCT (LG') verificados em estudos realizados por Caetano (2024) e Cardoso *et al.* (2024) para solos de subleito em outras regiões do Distrito Federal, com valores de 146 MPa e 99,3 MPa, respectivamente.

Estes valores estão associados intrinsecamente às características de solo profundamente intemperizado e lixiviado, metaestável, com grande volume de vazios, baixo peso específico e com sua matriz principalmente constituída de argila.

Foram realizadas análises considerando a estrutura de projeto e com variações da espessura do revestimento (R) e da base (B), de maneira a atenderem os parâmetros máximos admissíveis de deflexão (D_{adm}) e deformações (ε_t , ε_v), conforme Tabela 6.

Tabela 6. Valores atuantes no AEMC para a estrutura dimensionada por MR de ensaios de laboratório – comportamento linear (MR médio).

Parâmetro	Valor Admissível	Valor Atuante (AEMC)		
		Projeto – R = 15 cm	R = 14 cm	R = 13 cm / B = 18 cm
D_{adm} (mm)	$45,41 \times 10^{-2}$	$39,08 \times 10^{-2}$	$37,82 \times 10^{-2}$	$38,30 \times 10^{-2}$
ε_t	$1,99 \times 10^{-4}$	$1,38 \times 10^{-4}$	$1,25 \times 10^{-4}$	$1,32 \times 10^{-4}$
ε_v	$2,70 \times 10^{-4}$	$2,70 \times 10^{-4}$	$2,66 \times 10^{-4}$	$2,65 \times 10^{-4}$

Pelos resultados apresentados, verificou-se que, ao considerar os valores de MR obtidos nos ensaios laboratoriais, foi possível reavaliar as espessuras da camada de revestimento e de base, de maneira a tornar o custo da estrutura menos oneroso, já que a camada de revestimento constitui o item mais alto em custos de aquisição e execução em uma obra. Assim, de acordo com a Tabela 7, tem-se o custo estimado para cada tipo de solução apresentada na Tabela 6.

Tabela 7. Custo estimado de cada solução de projeto a partir de MR de ensaios em laboratório.

Camada da Estrutura	Projeto R = 15 cm (DER-DF, 2022)	R = 14 cm	R = 13 cm / B = 18 cm
Concreto asfáltico (CAUQ) ⁽¹⁾	R\$ 3.695.303,12	R\$ 3.448.949,58	R\$ 3.202.596,04
Fornecimento (CAUQ)	R\$ 5.535.458,56	R\$ 5.166.427,98	R\$ 4.797.397,42
Transporte (CAUQ)	R\$ 825.206,17	R\$ 770.192,42	R\$ 715.178,68
Brita Graduada Simples (BGS)	R\$ 1.508.681,35	R\$ 1.508.681,35	R\$ 2.715.626,43
Total	R\$ 11.564.649,20	R\$ 10.894.251,33	R\$ 11.430.798,57
Diferença em relação ao Projeto R = 15 cm		- R\$ 670.397,87	- R\$ 133.850,63

⁽¹⁾ Não foram considerados os custos do serviço, fornecimento e transporte de impressão e pintura de ligação.

Verifica-se que as soluções de projetos alternativas (R = 14 cm e R = 13 cm / B = 18 cm) conferem valores de custos inferiores aos da solução de projeto, ensejando, portanto, em economia para o custo total da obra. Esta economia de preço ofertada pela estrutura de R = 14 cm já contribui para



DOI: [10.29327/1430212.49-9](https://doi.org/10.29327/1430212.49-9)

IMPACTO ECONÔMICO NA PAVIMENTAÇÃO QUANDO DA ANÁLISE MECANÍSTICA-EMPÍRICA CONSIDERANDO MÓDULOS DE RESILIÊNCIA TEÓRICOS E OBTIDOS POR ENSAIOS

a aquisição de equipamentos uniaxiais e triaxiais disponíveis em território nacional, o que ensejará em ganhos futuros para a elaboração de outros projetos de pavimentação a partir de dados mais realísticos de módulo de resiliência.

Ademais, como o N de projeto ($5,96 \times 10^7$) refere-se a um tráfego muito pesado (IP-02/2004 SP), é aconselhável analisar outros possíveis tipos de soluções para a estrutura, como a execução da camada de base em brita graduada tratada com cimento (BGTC) ou em brita graduada melhorada com cimento (BGMC), que conferem maiores ganhos de rigidez para a camada e, assim, podem proporcionar redução da espessura da camada de revestimento asfáltico.

Neste sentido de avaliar os efeitos das melhorias nos materiais, no laboratório do DER-DF, encontram-se em desenvolvimento diversos estudos, contando com a participação dos autores do presente estudo. Entre estes, citam-se estudos recentes para obtenção de parâmetros de MR em BGMC (adição de 2% de cimento) que mostraram, preliminarmente, aumento de MR para este material, na ordem de 720 MPa. Em relação à mistura de solo melhorado com cal no teor de 4%, estão sendo avaliados os desempenhos mecânico elástico (MR) e plástico (DP) desta mistura ao longo do tempo (1, 3, 30, 60, 90 e 150 dias) de solos com comportamentos laterítico (LG') e não laterítico (NS'), da mesma região do presente estudo (SILVA; CAETANO; ZANCHETTA, 2024).

Dada a importância das deformações elásticas e plásticas, a estrutura em estudo deveria ainda ser analisada pelos critérios de deformação permanente para as subcamadas granulares e, para o revestimento, a realização de análises de fadiga (curva de fadiga) e *flow number* (deformação permanente), parâmetros substanciais elencados pela mecânica dos pavimentos e que são contemplados dentro das diretrizes dadas pelo MeDiNa, bem como a avaliação da previsão de desempenho da estrutura (pelo MeDiNa, porcentagem de área trincada – 30%) e análise de confiabilidade.

CONCLUSÕES

A análise mecanística elaborada por meio de ensaios laboratoriais é um procedimento crucial para a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais utilizados em estruturas de pavimentos. A partir de ensaios uniaxiais dinâmicos e triaxiais dinâmicos em misturas asfálticas e solos, é possível obter parâmetros que refletem com maior precisão o comportamento de cada material. Estes parâmetros contribuem significativamente para o dimensionamento correto das estruturas, garantindo que as condições reais sejam consideradas no processo.

Muitas pesquisas e aplicações práticas vêm demonstrando que o uso destes equipamentos, para obtenção de parâmetros mecânicos, oferece resultados mais confiáveis do que a aplicação de valores teóricos baseados em diretrizes normativas, que por vezes não refletem a realidade geotécnica local da obra de pavimentação a ser realizada. Assim, soluções derivadas exclusivamente de teorias podem não ser as mais adequadas, especialmente quando se leva em conta o custo total do projeto e a interação entre as diferentes camadas do pavimento.

O investimento em equipamentos para ensaios laboratoriais é viável em termos econômico e ambiental, uma vez que o custo adicional é compensado pela redução no consumo de materiais e esforços, resultante de um dimensionamento mais eficiente, que utiliza valores de Módulo de Resiliência (MR) coerentes com a realidade dos materiais. Esta abordagem permite a construção de pavimentos com uso otimizado dos recursos, promovendo não só maior durabilidade, mas também maior sustentabilidade.

O estudo de caso apresentado confirmou a importância de se usar valores de MR obtidos a partir de



PAULO COSTA FERNANDES,
 GISANDRA FARIA DEPAULA, MATEUS RIBEIRO CAETANO,
 RAFAEL CERQUEIRA SILVA, VÍTOR DO NASCIMENTO E SILVA,
 JOSIENE CHRYSTINA RIBEIRO CARDOSO, FÁBIOZANCHETTA

ensaios laboratoriais para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Uma sugestão para trabalhos futuros é investigar como a interação entre as camadas de diferentes rigidezes afeta a estrutura do pavimento e como isso pode ser otimizado para maximizar a vida útil do projeto. Nesse sentido, para compatibilizar as diferentes escalas, de campo e laboratório, também é importante que sejam feitos investimentos no monitoramento das condições funcional e estrutural dos pavimentos em operação, a partir de um Sistema de Gerenciamento de Pavimentos eficiente.

Assim, com o aumento do conhecimento dos comportamentos dos materiais, avaliados por meio de corpos de prova ensaiados em laboratório e do desempenho observado em campo, pode-se fundamentar melhor os projetos, construindo pavimentos mais resistentes, duráveis e econômicos. E, por meio de maiores investimentos em técnicas e tecnologias para realização de ensaios, sejam de laboratório e/ou campo, bem como de monitoramentos, haverá melhoria nas práticas de engenharia, refletindo em pavimentos com tempo vida de projeto mais próximo do real desempenho.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pelos conhecimentos técnicos-científicos adquiridos, à Superintendência Técnica (SUTEC) do DER-DF pelo apoio no desenvolvimento de diversas pesquisas de conclusão de curso, mestrado e doutorado e pela disponibilização dos dados de projeto e à Diretoria de Estudos Tecnológicos (DITEC), unidade da SUTEC, pela disponibilização dos laboratórios de solos e misturas asfálticas para a realização dos ensaios laboratoriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMC, Análise Elástica de Múltiplas Camadas. *Software*. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina>.
- Caetano, M. R. (2024). Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais e materiais britados de pavimentos rodoviários do Distrito Federal e do Estado de Roraima. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, DF, 264 p.
- Cardoso, J. C. R.; Caetano, M. R.; Paula, G. F.; Silva, R. C.; Fernandes, P. C (2024). Influência da variação de umidade pós-compactação nos módulos de resiliência de solos de subleito do Distrito Federal. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – XXI COBRAMSEG. Balneário Camboriú, SC, (no prelo).
- DER-DF, Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (2015). Unidades pedológicas do Distrito Federal – Planta. Adaptado Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA). Obtido junto à Diretoria de Meio Ambiente do DER-DF (DIMAM).
- DER-DF, Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (2022). Licitações Disponível em <<https://www.der.df.gov.br/licitacoes/>>. Concorrência nº 005/2022. Acesso em 24 de abril de 2024.
- DER-SP, Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (2006). IP-DE-P00/001. Projeto de pavimentação. São Paulo, SP.
- DNER (1981). Método de projeto de pavimentos flexíveis. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2026). Publicação IPR-719. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT 134/2018-ME. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT 135/2018-ME. Pavimentação – Misturas



[DOI: 10.29327/1430212.49-9](https://doi.org/10.29327/1430212.49-9)

IMPACTO ECONÔMICO NA PAVIMENTAÇÃO QUANDO DA ANÁLISE MECANÍSTICA-EMPÍRICA
CONSIDERANDO MÓDULOS DE RESILIÊNCIA TEÓRICOS E OBTIDOS POR ENSAIOS

asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro. RJ.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2021). DNIT IS-247. Estudos para elaboração de projetos de implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa. Brasília, DF.

Fernandes Júnior, J. L. (1994). Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 244 p.

Inoue, D. K. N.; Fernandes Junior, J. L. (2023). Mechanistic-empirical assessment of axle load legal limits on Brazilian roadways. Revista Transportes. Volume 32. Número 1. DOI: 10.58922/transportes.v31i2.2888

Paula, G. F; Fernandes, P. C.; Silva, R. C. (2022). Estudo comparativo entre os métodos de dimensionamento de pavimentos: DNER e mecanístico-empírico (MEDINA) no DER/DF. 24º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) / 47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), Bento Gonçalves, RS.

PMSP, Prefeitura Municipal de São Paulo (2004). IP - 02/2004. Classificação das vias, São Paulo, SP.

PMSP, Prefeitura Municipal de São Paulo (2004). IP - 08/2004. Análise mecanicista à fadiga de estruturas de pavimento, São Paulo, SP.

Silva, V. N.; Caetano, M. R.; Zanchetta, F. (2024). Análise da influência da adição de cal hidratada em solos do Distrito Federal por meio dos ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente para fins de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, DF, *(no prelo)*.



ASPECTOS RELEVANTES DA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA USO EM ANÁLISES NO MeDiNa

Vanessa Rebouças Santana¹; Mario Sergio de Souza Almeida²; Weiner Gustavo Silva Costa²; Maria do Socorro Costa São Mateus¹; Ítalo Miller Machado Pereira¹ & Acbal Rucas Andrade Achy²

RESUMO

Após quase 60 anos de utilização do método empírico que utiliza o ensaio estático, para obtenção do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR) para dimensionamento de pavimentos asfálticos, a infraestrutura rodoviária brasileira está vivenciando um momento histórico. Nesse sentido, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) formalizou em 2020 o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), um método mecanístico-empírico baseado, majoritariamente, em parâmetros de resistência e deformabilidade dos materiais obtidos por meio de ensaios dinâmicos. Sabe-se que a realização desses ensaios ainda não é um procedimento comum em diversas regiões do país devido ao seu custo elevado, bem como dos equipamentos utilizados. Entretanto, a caracterização mecânica dos materiais é de grande importância no contexto do dimensionamento mecanístico-empírico e no processo de calibração do novo método. Desse modo, o presente estudo teve por objetivo a caracterização dos solos, materiais granulares e material estabilizado quimicamente, coletados em um segmento experimental PRO-MeDiNa na BR-420/BA, por meio da realização de ensaios laboratoriais de caracterização como, por exemplo, granulometria, limites de consistência e massa específica dos grãos, além dos ensaios dinâmicos de Módulo de Resiliência e Deformação Permanente, a fim de obter os parâmetros necessários para a utilização do novo método. Os resultados revelaram materiais geotécnicos com bom comportamento mecânico e ratificaram a importância da realização dos ensaios de caracterização e mecânicos no dimensionamento de pavimentos, por meio do MeDiNa.

PALAVRAS-CHAVE: solos; materiais britados, materiais tratados quimicamente; módulo de resiliência; deformação permanente.

ABSTRACT

After almost 60 years of applying the empirical method that uses the static test to obtain the California Bearing Ratio (CBR) for designing asphalt pavements, Brazilian road infrastructure is experiencing a historic moment. The National Department of Transport Infrastructure (DNIT), formalized in 2020 the National Designing Method (MeDiNa), a mechanistic-empirical method based mainly on resistance and deformability parameters of materials obtained through dynamic tests. It is known that carrying out these tests is not yet a common procedure in several regions of the country due to their high cost, as well as the equipment used. However, the mechanical characterization of materials is of great importance in the context of mechanistic-empirical sizing and in the process of localizing the new method. Therefore, this study presents the characterization of soils, granular materials and chemically stabilized material, obtained in a PRO-MeDiNa experimental segment in BR-420/BA road, by carrying out laboratory characterization tests, such as, particle size analysis, limits of consistency and specific gravity of solids, in addition to dynamic Resilience Modulus and Permanent Deformation tests, in order to obtain the necessary parameters for using the new method. The results showed geotechnical materials with good mechanical behavior and confirmed the importance of carrying out characterization and mechanical tests when MeDiNa method is applied to design pavements.

KEY WORDS: soils; crushed materials, chemically treated materials; resilience module; permanent deformation.

¹ Universidade Estadual de Feira de Santana, PPGECEA-DTEC, e-mail: vanessarseng@gmail.com; socorro@uefs.br; italomillermachado@hotmail.com.

² Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, e-mail: mario.almeida@ufrb.edu.br; weiner@ufrb.edu.br; acbal@ufrb.edu.br.



DOI: [10.29327/1430212.49-15](https://doi.org/10.29327/1430212.49-15)

ASPECTOS RELEVANTES DA CARACTERIZAÇÃO DE
MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA USO EM ANÁLISES NO MeDiNa

INTRODUÇÃO

A qualidade das rodovias depende fundamentalmente das características e do comportamento mecânico das camadas, que compõem o conjunto capa asfáltica; base; sub-base e subleito. Determinar esses parâmetros para cada camada individualmente e analisar o resultado da interação entre elas, frente às solicitações de tráfego, permite a elaboração de projetos que garantam durabilidade e vida útil adequada para os pavimentos.

Neste sentido, a partir de 2014, por iniciativa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), deu-se início à criação do método mecanístico-empírico brasileiro para dimensionamento de pavimentos asfálticos, momento histórico para a infraestrutura rodoviária brasileira, após quase 60 anos da criação do método empírico de Murilo Lopes, ou método do *California Bearing Ratio* (CBR). Em 2020, foi lançada pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do DNIT a primeira versão do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), nome escolhido em homenagem ao professor Jacques de Medina, grande precursor da Mecânica dos Pavimentos no país. O novo método foi desenvolvido em parceria com o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Atualmente, o MeDiNa encontra-se na fase de calibração nacional, cujas ações e procedimentos necessários para a implantação de segmentos experimentais, foram definidas pelo DNIT e encontram-se detalhadamente apresentados no guia PRO-MeDiNa (DNIT, 2023). O referido guia prevê, em linhas gerais, a implantação de segmentos experimentais vinculados a contratos de construção de pavimentos asfálticos novos ou restaurados, onde na fase de obra todos os serviços e materiais são amplamente controlados e, na fase de operação da via, os segmentos são monitorados por um período mínimo de cinco anos.

O MeDiNa surgiu para levar em consideração indicadores de desempenho, relacionados com os dois principais defeitos observados nos pavimentos asfálticos brasileiros: trincamentos por fadiga (deformações elásticas), estimando o percentual de área trincada (AT), e afundamentos de trilhas de roda (ATR) gerados pelo acúmulo de deformações plásticas, ambos resultantes das solicitações sofridas pelo pavimento durante a passagem dos veículos.

A Função de Transferência (FT) utilizada no *software* do método, proposta por Fritzen (2016), que teve a metodologia atualizada por Fritzen *et al.* (2019), busca transformar o dano sofrido pelo pavimento em percentual de área trincada (AT). Para o modelo de deformação permanente, que representa o ATR, o MeDiNa utilizou o modelo proposto por Guimarães (2009), para as camadas granulares subjacentes ao revestimento.

Em geral, para o cálculo de tensões e deformações para uma análise mecanístico-empírica, é necessário determinar os parâmetros de deformabilidade dos materiais de cada camada, por meio de ensaios específicos. Desse modo, para a caracterização geotécnica dos materiais, além da realização dos ensaios ditos convencionais de granulometria, limites de consistência e massa específica dos grãos, são determinados os parâmetros obtidos de ensaios dinâmicos, representados pelo módulo de resiliência (MR), relacionado ao comportamento elástico dos materiais, e a deformação permanente (DP), que traduz o comportamento plástico.

Cabral (2021) afirma que para estudar o MR e a DP e obter suas estimativas, ensaios mais sofisticados, que necessitam de conhecimentos práticos e técnicos mais consolidados, são realizados. Os ensaios com carregamento cíclico são um exemplo. Segundo Lima (2020), eles são imprescindíveis, porque simulam melhor o número de solicitações do tráfego em campo. E, além de cíclico, o carregamento vertical deverá ser inferior àquele que provoca a ruptura. Nesse contexto, os



ensaios que melhor representam as condições reais de solicitação de tráfego no campo, em pavimentos, são os ensaios triaxiais de cargas repetidas para solos e britas, os quais fornecem parâmetros como MR e DP.

Contudo, de acordo com Schreinert *et al.* (2023), esse campo de pesquisa ainda apresenta diversas lacunas de conhecimento, devido à alta complexidade associada ao modo como se dá o desenvolvimento das deformações resilientes geradas pelos carregamentos cíclicos, levando em consideração, ainda, a existência de materiais com diferentes propriedades e a vasta quantidade de variáveis influentes no processo. Por exemplo, o ensaio triaxial para obtenção da DP, pode ser desenvolvido em monoestágio, onde são moldados distintos corpos de prova (CP) para cada par de tensão utilizada (no Brasil, o ensaio de DP é regulamentado pelo DNIT e determina um número mínimo de 6 CPs), ou em multiestágios, sendo capaz de prever as características de deformabilidade do solo, de interesse para a pavimentação, em um período mais curto.

Diante do exposto, o presente estudo tem por objetivo a caracterização e obtenção dos parâmetros mecânicos de resistência e deformabilidade dos solos, materiais granulares e material melhorado quimicamente utilizados em um segmento experimental PRO-MeDiNa da BR-420/BA, por meio de ensaios de MR e DP, que estão sendo utilizados para análise e previsão de vida útil do pavimento, em termos de AT e ATR, utilizando o MeDiNa.

MATERIAIS E MÉTODOS

A implantação do segmento experimental do programa PRO-MeDiNa na BR-420/BA foi realizada entre os meses de abril e maio do ano de 2023 e contou com a obra de reconstrução das duas faixas de um pavimento asfáltico, com uma extensão de 220 m, entre o km 315 e 315,22 da rodovia, coordenadas 13°22'23.64''S (latitude) e 39°53'13.36''O (longitude).

As soluções idealizadas para o local contemplaram diferentes seções experimentais, diferenciadas pelo uso de base granular em solo-brita, nos primeiros 120 m, e base com solo melhorado adotando 3% de cimento (SMCC), nos 100 m finais, totalizando 220m, conforme ilustrado na Figura 2. Esta obra foi prevista no planejamento de manutenção periódica da rodovia BR-420/BA, que faz parte do plano anual de manutenção e conservação de rodovias do DNIT no estado da Bahia, conhecido como Programa Anual de Trabalho e Orçamento (PATO). A necessidade da reconstrução se deu em função de problemas de drenagem no local, os quais danificaram consideravelmente o pavimento existente, demandando a elevação do greide original (Figura 1) em cerca de 38 cm (Figura 2).

Anteriormente à execução do segmento experimental, no final do mês de março de 2023, foram abertas duas janelas no pavimento existente, com dimensão aproximada de 1 m x 1 m, para realização da coleta do material de subleito (Figura 1). Buscou-se posicionar as janelas de forma a abranger as duas soluções de base das seções experimentais, que posteriormente seriam executadas (Figura 2). Verificou-se nesta sondagem preliminar que o pavimento existente era composto por apenas três camadas, sendo elas o revestimento em concreto asfáltico, base e subleito, ambas em solo, conforme a Figura 2.

A segunda etapa coletou as amostras dos materiais utilizados nas camadas do pavimento reconstruído e foi efetuada durante a execução do segmento experimental. O primeiro material coletado nessa etapa foi o da camada de reforço de subleito, já no primeiro dia de obra (01/04/2023). Na preparação dessa camada, executada de acordo com a DNIT 138 - ES (DNIT, 2010), foi prevista a reciclagem do revestimento existente (4 cm de espessura), com sua incorporação à camada de base granular também existente (utilizando 16cm desta base), formando uma espessura de 20 cm de mistura solo-RAP, portanto, uma mistura com 20% de RAP, cujo



DOI: 10.29327/1430212.49-15

ASPECTOS RELEVANTES DA CARACTERIZAÇÃO DE
MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA USO EM ANÁLISES NO MeDiNa

material foi coletado, após umedecimento e homogeneização, na projeção vertical das janelas J01 e J02 abertas na etapa de sondagem preliminar.

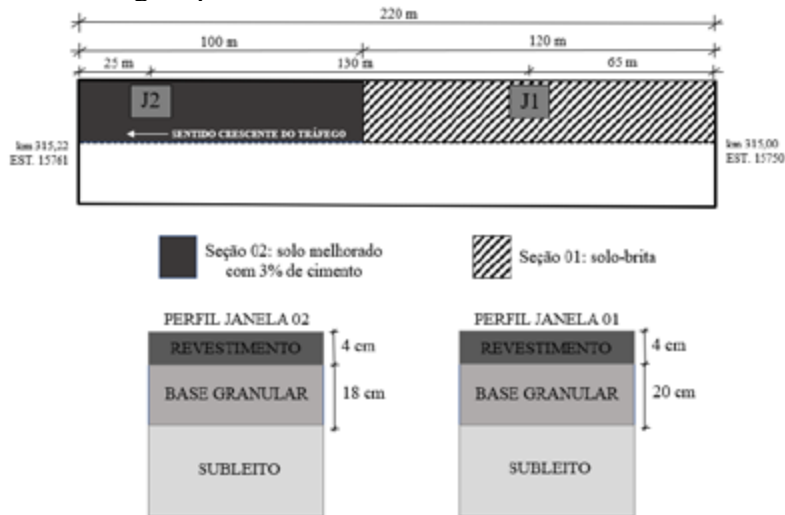


Figura 1 - Esquema representativo das janelas abertas no pavimento e seus perfis (sondagem preliminar)

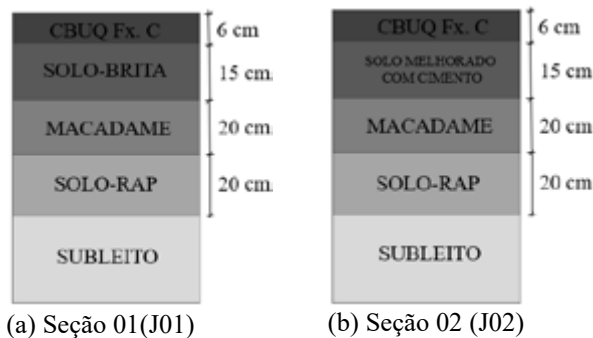


Figura 2 - Seções experimentais do presente estudo (após a reconstrução do pavimento)

A caracterização dos materiais das camadas do pavimento em laboratório, para avaliação do segmento experimental no MeDiNa, envolveu ensaios geotécnicos, onde o material coletado de cada camada, nas janelas J01 e J02 (Figura 1), foi devidamente caracterizado, incluindo testes convencionais e dinâmicos, cujos resultados de módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP) serviram para modelar o comportamento das camadas granulares.

Na reconstrução do pavimento, o material da camada de sub-base, constituída por macadame seco (DER-SP, 2005), foi coletado para a realização do ensaio de abrasão Los Angeles. Vale destacar, entretanto, que por ser o macadame seco um material de grandes dimensões, com diâmetro nominal máximo, da ordem de 100 mm, os parâmetros de resistência e deformabilidade desse material não puderam ser obtidos em laboratório, considerando os equipamentos disponíveis. Seu comportamento mecânico, associado ao MR, foi determinado por retroanálise das bacias deflectométricas obtidas com viga Benkelman, para garantir o controle de qualidade de execução da camada. Os parâmetros de DP e MR para uso no MeDiNa, entretanto, foram associados ao de uma brita graduada de gnaiss (C2), contida no banco de dados do próprio *software* do método, com



valor de MR próximo ao obtido na retroanálise para o macadame. Além disso, por meio de análise simples das constantes do modelo de Guimarães (2009), para cada material disponível, considerou-se como a C2 menos deformável dentre as existentes naquele banco de dados, para representar a deformabilidade do macadame utilizado na obra, conforme procedimento similar adotado por Chiarello *et al.* (2019).

O traço do material constituinte da camada de base em solo-brita da seção experimental 01 foi composto por 50% de cascalho advindo de jazida próxima, 20% de areia lavada e 30% de brita de granito, com diâmetro nominal máximo de 1", mistura coletada na projeção vertical da Janela 01, após o umedecimento e homogeneização do material. O traço do material de base da seção experimental 02, constituído por solo melhorado com cimento (SMCC), composto por 77% de cascalho, 20% de areia lavada e 3% de cimento CP II F 32, dosado em peso em relação à massa seca total da mistura, foi coletado na projeção vertical da Janela 02, também após umedecimento e homogeneização da mistura de cascalho e areia na pista, com finalização do processo de mistura do cimento em laboratório, para garantir a compactação sem a ocorrência de cura e pega da mistura.

Conforme prescrito no guia PRO-MeDiNa (DNIT, 2023), na caracterização destes materiais granulares foram realizados os ensaios de Análise Granulométrica, método de ensaio DNER 051 - ME (DNIT, 1994); Limite de Liquidez, DNER 082 - ME (DNIT, 1994); Limite de Plasticidade DNER 122 - ME (DNIT, 1994); Determinação da Densidade Real DNER 093 - ME (DNIT, 1994); além dos ensaios de Compactação DNIT 164 - ME (DNIT, 2013); *Califórnia Bearing Ratio* (CBR), DNIT 172 - ME (DNIT, 2016), e classificação pela metodologia MCT, de acordo com o DNER 259 - ME (DNIT, 2023). Na caracterização mecânica foram realizados os ensaios de Módulo de Resiliência, DNIT 134 - ME (DNIT, 2018), e Deformação Permanente, instrução de ensaio DNIT 179 - IE (DNIT, 2018). Nos ensaios de compactação e CBR adotou-se as energias do Proctor Normal, Intermediário e Modificado para os materiais das camadas de subleito, reforço e para os materiais de base, respectivamente.

Além disso, o ensaio de CBR para a base de SMCC foi realizado de acordo com a norma DERBA-ES-P-06/01 (DERBA, 2001). Desse modo, as amostras enleiradas e em seu ponto de umidade ótima permaneceram 72h em cura ao ar e, posteriormente, foram corrigidas suas umidades, complementando-as com água até o teor ótimo novamente, para serem compactadas e, imediatamente após esse processo, submetidas ao ensaio de CBR. Por fim, os CPs foram imersos no tanque, para realização das leituras de expansão a cada 24h, por 4 dias.

Para a caracterização mecânica dos solos, materiais granulares e material tratado quimicamente, por meio dos ensaios de MR e DP, os corpos de prova foram compactados nas mesmas energias aplicadas para obtenção da curva de compactação e realização dos ensaios de CBR. Para a realização desses ensaios dinâmicos, utilizou-se o cilindro de dimensões 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para todas as amostras moldadas. Além disso, os corpos de prova do material de base de SMCC, após compactação, permaneceram em cura em ambiente com controle de umidade relativa (> 95%) e temperatura do ar igual a 25 °C por 7 dias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização geotécnica

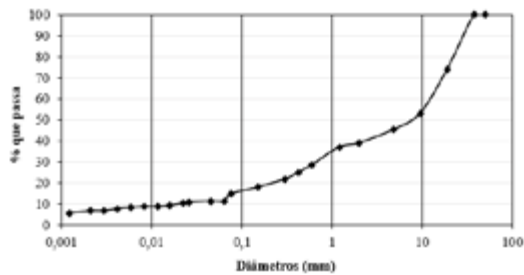
A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas obtidas para cada material. Observa-se que o solo de subleito da seção 02 possui um maior percentual de finos (34,8%), quando comparado ao subleito da seção 01 (19,2%). Para a camada resultante da reciclagem, um solo-RAP com



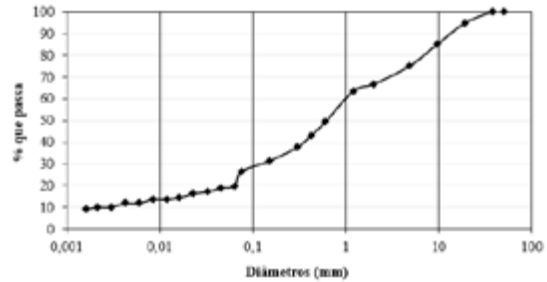
DOI: 10.29327/1430212.49-15

ASPECTOS RELEVANTES DA CARACTERIZAÇÃO DE
MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA USO EM ANÁLISES NO MeDiNa

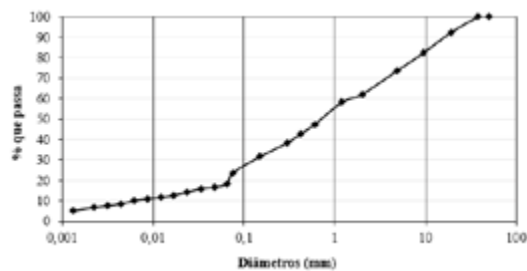
aproximadamente 80% do solo da base e 20% de revestimento asfáltico existente, nota-se que a composição dos materiais de reforço de subleito apresenta valores idênticos para os percentuais de areia média e silte. Quanto aos materiais de base, a base solo-brita possui um maior percentual de pedregulho (60,9%) e menor de areia (27,8%), quando comparada a base SMCC, a qual possui um maior percentual de areia (46,9%) e menor de pedregulhos (33,1%).



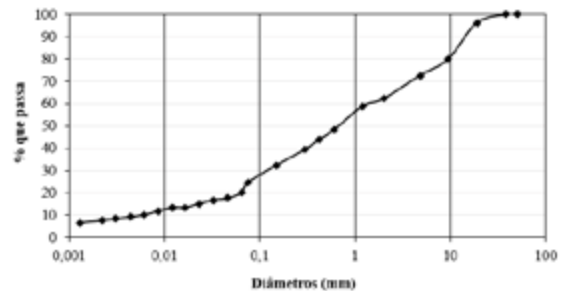
(a) Base – Seção 01



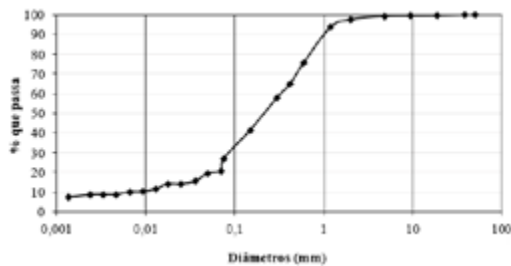
(b) Base – Seção 02



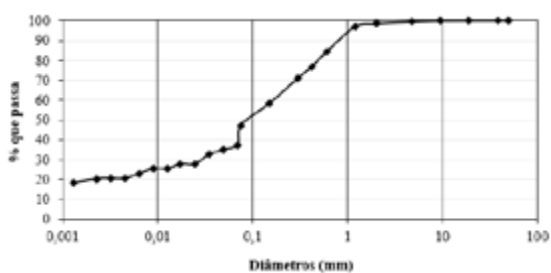
(c) Reforço do Subleito - Seção 01



(d) Reforço do Subleito - Seção 02



(e) Subleito – Seção 01



(f) Subleito – Seção 02

Figura 3 – Curvas Granulométricas dos materiais depois da reconstrução

As granulometrias dos materiais das camadas das duas seções estão apresentadas, por peneira, na Tabela 1, juntamente com os respectivos enquadramentos dos materiais de base nas faixas estabelecidas nas especificações DNIT 141 - ES (DNIT, 2022a) e DNIT 142 - ES (DNIT, 2022b). Nota-se na Tabela 1 que as granulometrias dos materiais de subleito das duas seções são bastante distintas, com a seção 02 apresentando um subleito consideravelmente mais fino que o da seção 01, fato que ajuda a justificar a diferença de plasticidade entre estes dois materiais (Tabela 2). Quanto aos resultados dos materiais da camada de reforço do subleito observa-se que, granulometricamente, as amostras de solo-RAP testadas apresentam grande similaridade nas duas



seções executadas, demonstrando a homogeneidade gerada na operação de reciclagem da camada de base antiga, com a incorporação do revestimento existente, transformando o material resultante na camada de reforço de subleito do pavimento reconstruído. Por fim, com relação as granulometrias das amostras de base das duas seções, nota-se que o solo-brita da seção 01 se enquadra na faixa B da DNIT 141 - ES (DNIT, 2022a), enquanto o SMCC da camada de base da seção 02 não se enquadrou em nenhuma das quatro faixas da DNIT 142 - ES (DNIT, 2022b).

Tabela 1 – Porcentagem que passa dos materiais analisados de acordo com a DNIT 141 - ES (DNIT, 2010)

Peneiras	Seção 01 (J01)			Seção 02 (J02)		
	Subleito	Reforço	Base	Subleito	Reforço	Base
2"	100	100	100	100	100	100
1"	100	95,07	82,78	100	97,46	96,62
3/8"	99,42	82,59	53,07	99,93	79,84	85,04
#4	99,20	73,65	45,37	99,53	72,51	75,04
#10	97,49	62,28	39,08	98,61	62,14	66,87
#40	64,83	42,87	25,03	76,93	43,75	43,16
#200	26,88	23,68	14,87	47,25	24,52	26,66
Faixa DNIT	-	-	B	-	-	-

A Tabela 2 apresenta o resumo dos demais ensaios de caracterização, realizados com os materiais de ambas as seções experimentais.

Tabela 2 – Resumo dos ensaios de caracterização dos materiais

Parâmetros	LL (%)	LP (%)	IP (%)	ρ_s (g/cm ³)	$\rho_{dmáx}$ (g/cm ³)	W_{ot} (%)	TRB	c'	d'	Pi (%)	e'	Classificação MCT
Seção 01	Base	-	-	NP	2,74	2,31	5,7	-	-	-	-	-
	Reforço	-	-	NP	2,65	2,10	5,3	-	-	-	-	-
	Subleito	-	-	NP	2,62	2,00	9,0	A-2-4	0,73	53,4	103	1,12
Seção 02	Base	-	-	NP	2,71	2,07	7,9	-	-	-	-	-
	Reforço	-	-	NP	2,67	2,24	6,3	-	-	-	-	-
	Subleito	33	21	12	2,69	1,78	15,0	A-6	1,98	133,7	60	0,91

De acordo com a Tabela 2, o solo de subleito da seção 01 é classificado, segundo a TRB e MCT, respectivamente, como A-2-4 e LA', tratando-se, segundo a TRB, de um material pedregulhoso ou areia siltosa ou argilosa, com comportamento adequado para subleito, enquanto o da seção 02 é classificado como A-6 e LG', solo argiloso não adequado para subleito. Segundo a metodologia MCT, estes solos correspondem, respectivamente, a um material arenoso laterítico e argiloso laterítico, sendo ambos, portanto, de excelente qualidade para uso em pavimentação.

Segundo Villibor e Alves (2019), nas granulometrias típicas segundo as designações do T1-71 do DER-SP, o grupo LA' trata-se de areias argilosas, as quais possuem baixa expansão, baixa a média contração e baixo coeficiente de permeabilidade. Desse modo, fazem parte desse grupo MCT as areias argilosas com uma quantidade média de finos lateríticos, as quais apresentam um coeficiente



DOI: 10.29327/1430212.49-15

ASPECTOS RELEVANTES DA CARACTERIZAÇÃO DE
MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA USO EM ANÁLISES NO MeDiNa

de argilosidade c' com um valor médio, neste caso, 0,73. Na classificação pedológica, esses solos abrangem os latossolos ou argilossolos, com uma textura média-arenosa. Os solos desse grupo MCT, apresentam uma coesão razoável e um valor elevado de MR, quando são utilizados em camadas nobres de pavimentos, podendo ser superiores a 200 MPa. Ressalta-se que, o grupo LA' contempla os melhores solos, para utilização em bases e sub-bases de pavimentos asfálticos.

Já os solos LG' ou lateríticos argilosos, compõem o grupo onde estão incluídas as argilas, argilas arenosas e/ou siltosas e os siltes argilosos (o que está de acordo com os resultados de granulometria e Limites de Atterberg), os quais possuem um coeficiente de argilosidade c' elevado, neste caso, 1,98. Na classificação pedológica, esses solos também abrangem os latossolos ou argilossolos, porém com uma textura média-argilosa, diferente do solo de subleito da J01. Os solos que se classificam próximos aos LA' apresentam propriedades similares aos mesmos, entretanto, se $c' > 2,0$ (o que não é o caso desse subleito), os materiais passam a apresentar elevada contração em camadas compactadas, menor capacidade de suporte e menor MR (VILLIBOR e ALVES, 2019). Nesse sentido, ficou evidente a heterogeneidade granulométrica do solo de subleito, que apresentou dois tipos de materiais bastante distintos, mesmo em um segmento experimental de curta extensão, onde os materiais foram coletados em locais (J01 e J02) com apenas 130 m de distância (Figura 1). Os valores de umidade ótima estão compatíveis com a granulometria, o mais granular (base da seção 01) possui menor umidade ótima, sendo muito próximo dos valores encontrados para o reforço do subleito de ambas as seções, os quais receberam RAP. O material que possui mais finos (subleito da seção 02) apresentou o valor mais alto (15%).

Na Tabela 3 são apresentados os valores de CBR e expansão (Exp) dos materiais das camadas das duas seções experimentais.

Tabela 3 - Valores médios de CBR e expansão

Camada	Seção 01 (solo-brita)		Seção 02 (SMCC)	
	CBR (%)	Exp (%)	CBR (%)	Exp (%)
Subleito	19	0,0	6	0,0
Reforço	36	0,0	44	0,0
Base	53	0,0	111	0,0

Observa-se da Tabela 3 que o material de subleito da seção 01 apresentou resistência no ensaio de CBR cerca de 3 vezes superior ao material da seção 02. Este fato está relacionado diretamente com as características granulométricas e de plasticidade verificadas na Tabela 2. Em contrapartida, do ponto de vista de deformabilidade, ambos os materiais não apresentaram expansão, comportamento típico de solos finos lateríticos brasileiros, cujo argilomineral predominante é a caulinita. Quanto ao material de reforço em solo-RAP, as duas amostras apresentaram valores de CBR considerados adequados, qualificando-os, inclusive, para uso como camada de sub-base, conforme a DNIT 139 - ES (DNIT, 2010). Contudo, o valor de CBR 22% maior da amostra da seção 02, em relação à seção 01, pode estar relacionada à estruturação da amostra compactada para os ensaios, podendo conter agregados maiores posicionados na região da penetração do pistão, provocando pequenas discrepâncias.

Para os materiais de base das duas seções também se observou valores de CBR considerados adequados, com destaque para o material da seção 02, onde o cimento foi responsável pelo considerável incremento no valor deste parâmetro, em relação à brita adicionada na seção 01, já que



os demais constituintes de ambos os materiais foram os mesmos, cascalho e areia. Ressalta-se ainda que, o valor de CBR igual a 53% para a camada de base da seção 01, embora fosse inaceitável para o método de Murillo como material constituinte para esta camada (mínimo de 80%, conforme Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006)), para o MeDiNa, o mesmo é avaliado em termos de comportamento de MR e DP.

Caracterização mecânica

Os resultados médios do ensaio de MR completo estão apresentados na Tabela 4. O modelo que melhor se ajustou aos valores obtidos foi o composto, em todos os casos.

Tabela 4 – Módulos de Resiliência: Valores Médios e Constantes de Regressão

Seção	Camada	MR _{médio} (MPa)	Constantes de regressão			
			k ₁	k ₂	k ₃	R ²
Seção 01 (J01)	Base	320	1528,11	0,55	0,02	0,98
	Reforço	254	729,89	0,38	-0,01	0,98
	Subleito	84	521,06	0,46	0,15	0,97
Seção 02 (J02)	Base	581	3324,35	0,56	0,10	1,00
	Reforço	205	623,02	0,42	-0,03	0,93
	Subleito	274	312,13	0,22	-0,22	0,81

A diferença observada em termos de CBR entre as amostras de subleito das duas seções, onde o resultado da amostra da seção 01 foi mais de 3 vezes superior à amostra da seção 02, não somente não se confirmou em termos de MR médio (Tabela 4), mas a ordem foi invertida, com o MR da seção 02 mais de 3 vezes superior ao da seção 01. Isso demonstra a qualidade do material argiloso laterítico, em comparação ao arenoso laterítico, confirmando que a granulometria mais fina e existência de plasticidade não significa, necessariamente, comportamento mecânico deficiente, já que os finos contribuem com uma maior coesão após a compactação. Para os materiais de base, entretanto, os resultados confirmaram o comportamento em termos de CBR, com o SMCC apresentando MR médio cerca de 82% superior ao solo-brita. Os resultados dos ensaios de deformação permanente do solo de subleito, reforço e base, das duas seções experimentais, estão apresentados na Figura 4 e mostram que os dois materiais de subleito testados apresentaram comportamentos coerentes com seus respectivos MR e processo de laterização do material, com o subleito da seção 01 mais deformável plasticamente que o da seção 02. Em relação às amostras de solo-RAP os resultados foram, também, bastante similares, seguindo o que já havia sido verificado para a granulometria, plasticidade e MR. Por fim, os resultados para os materiais de base mostram o solo-brita mais deformável que o SMCC, conforme esperado, devido a capacidade do cimento em melhorar o comportamento mecânico da mistura, como aconteceu com o MR.



DOI: 10.29327/1430212.49-15

ASPECTOS RELEVANTES DA CARACTERIZAÇÃO DE
MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA USO EM ANÁLISES NO MeDiNa

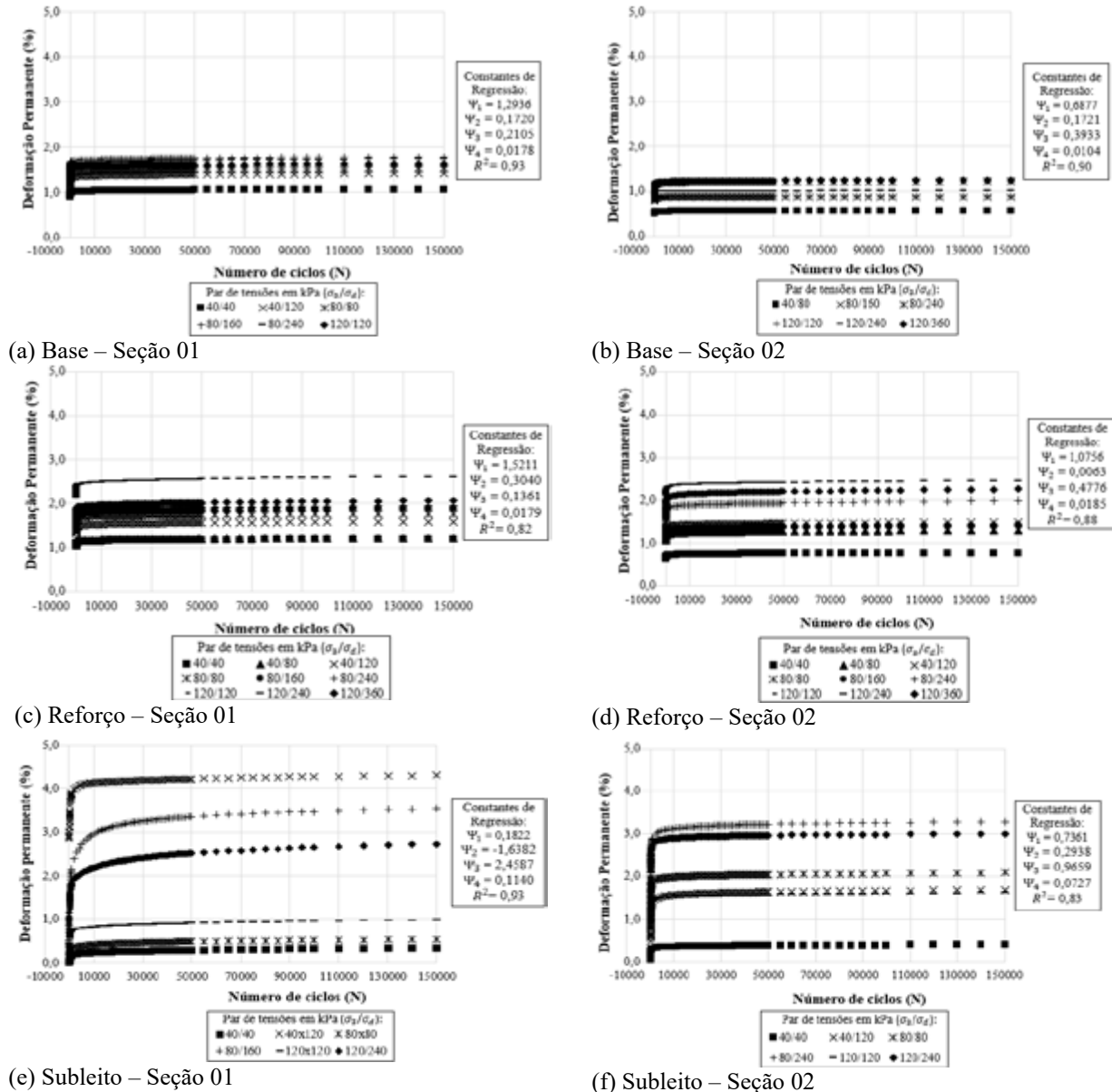


Figura 4 – Gráficos de DP para os materiais depois da reconstrução

CONCLUSÃO

Por meio dos resultados obtidos com a caracterização dos materiais coletados antes e durante a reconstrução do segmento experimental PRO-MeDiNa da BR-420/BA, foi possível concluir que os materiais estudados possuem comportamento adequado, sendo esperado um bom desempenho em campo. Dessa forma, com os valores de MR adequados para cada camada e deformação permanente tendendo à estabilização, espera-se também que os materiais contribuam pouco com o ATR do pavimento.

Outro fator favorável associado a minimização dos defeitos, é que os solos de subleito lateríticos são adequados para serem utilizados em pavimentação, por apresentarem bom comportamento



mecânico. Ademais, o solo-RAP apresentou vantagens para utilização como reforço do subleito, visto que a mistura, além de apresentar bons parâmetros que viabilizaram a utilização nessa camada, é uma solução alternativa que impacta menos no meio ambiente, diminuindo a demanda por materiais de jazidas naturais e evitando o descarte do resíduo asfáltico na natureza.

REFERÊNCIAS

CABRAL, W. S. Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da microrregião de Mossoró/RN. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

CHIARELLO, G. P.; PASCOAL, P. T.; SANTOS, T. A.; PEREIRA, D. da S.; BARONI, M.; GERGING, R. P. Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo método do DNER (1981) e MeDiNa (2019): Estudo de caso da duplicação da BR 287 - Trecho Santa Cruz do sul à Tabaí/RS. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte ANPET, Balneário Camboriú, 2019.

Departamento de Estradas e Rodagens da Bahia (DERBA). Base de solo melhorado com cimento - Especificação de serviço. DERBA-ES-P-06/01. 9p., 2001.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Guia para execução de segmentos experimentais – PRO-MeDiNa - Manual. Brasília, IPR. Publ. 719, 2023.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. IPR, 3ª Ed. Rio de Janeiro, 2006.

DER-SP - Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo. Pavimentação: Macadame seco. São Paulo, 12 p., 2005.

DNER-ME 051/1994. Solos – Análise Granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1994.

DNER-ME 082/1994. Solo – Determinação do limite de plasticidade – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 1994.

DNER-ME 093/1994. Solos – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro/RJ, 1994.

DNER-ME 122/1994. Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro/RJ, 1994.

DNER-ME 134/2018. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

DNER-ME 164/2013. Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2013.

DNER-ME 172/2016. Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2016.

DNIT 138/2010 – ES. Pavimentação – Reforço do subleito - Especificação de serviço. Rio de Janeiro/RJ, 2010.

DNIT 139/2010 – ES. Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro/RJ, 2010.



[DOI: 10.29327/1430212.49-15](https://doi.org/10.29327/1430212.49-15)

ASPECTOS RELEVANTES DA CARACTERIZAÇÃO DE
MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA USO EM ANÁLISES NO MeDiNa

DNIT 141/2022 – ES. Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro/RJ, 2022a.

DNIT 142/2022 – ES. Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro/RJ, 2022b.

DNIT 179/2018 – IE. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

DNIT 259/2023 - CLA. Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação. Rio de Janeiro/RJ, 2023.

FRITZEN, M. A. Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos. 286p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2016.

FRITZEN, M. A.; FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G.; UBALDO, M. O. Atualização da função transferência do dano de fadiga para a área trincada do programa MeDiNa. Anais do 90 Congresso Rodoviário Português, 2019.

GUIMARÃES, A. C. R. Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. 367p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2009.

LIMA, C. D. A. Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas. 452 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro, COPPE, 2020.

SCHREINERT, G. G.; KERN, C.; NÚÑEZ, W. P.; BRITO, L. A. T. Efeito do histórico de tensões na resposta elástica de solos sob a perspectiva de ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente. 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), 2023.

VILLIBOR, D.F.; ALVES, D.M.L. Pavimentação de baixo custo para regiões tropicais: Projeto e Construção – Novas considerações. 1. Ed. Florianópolis: Tribo Ilha, 2019. 544 p.



ESTUDO DE REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS DEFLECTOMÉTRICOS REALIZADOS COM O TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER DEVICE (TSDd) NO BRASIL

Felipe F. Camargo¹; Caio M. Raul¹; Cecília F. Merighi²; Cláudio R.C. Dias²; Danilo M. Pitta & André F. Vale¹

RESUMO

Avaliações de deflexões por ensaios não destrutivos já fazem parte da rotina do mercado de infraestrutura em termos de avaliação estrutural de pavimentos. Este tipo de ensaio se iniciou na década de 1950, com o emprego da viga Benkelman e teve evolução importante na década de 1980 com o advento dos equipamentos do tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Todavia, em todos estes casos, a sistemática de ensaio e baixa produtividade desses equipamentos exigem a interdição de faixa para a caracterização da deflexão do pavimento, com interferência direta com os usuários. A mudança deste paradigma ocorre agora com a possibilidade de emprego de um *Traffic Speed Deflectometer Device* (TSDd), um equipamento que permite caracterizar a resposta estrutural de um pavimento de forma contínua e em velocidade de tráfego. O presente estudo buscou avaliar a repetibilidade dos resultados obtidos com o equipamento TSDd Falkorr® em relação aos requisitos mínimos da norma NORMA DNIT 440/2023 – PRO para avaliação estrutural contínua de pavimentos utilizando um equipamento móvel. Os resultados em termos de deflexão sob a carga (R^2 médio de 0,981) e em termos de índice de curvatura (R^2 médio de 0,983), demonstraram atendimento pleno à norma. Sendo assim, conclui-se que o Falkorr apresentou condições satisfatórias de repetibilidade interna do sistema para ambos os parâmetros (deflexão máxima e índice de curvatura modelados) e em concordância com a norma do DNIT, consistindo numa inovação que traz avanços não apenas técnicos mas também em relação a segurança viária na metodologia de avaliação de pavimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Traffic speed deflectometer device (TSDd), Deflexão contínua, inclinação de deslocamento, Repetibilidade, Segurança viária.

ABSTRACT

Pavement deflection evaluation using non-destructive tests are already part of the routine in the infrastructure market in terms of structural assessment of pavements. This type of test began in the 1950s with the use of the Benkelman beam, with significant advances in the 1980s with the introduction of the Falling Weight Deflectometer (FWD) equipment. However, in both cases, the testing sequence and low productivity of these devices require lane interruption for pavement deflection testing, with direct interference with users. The change in this paradigm now occurs with the possibility of using a Traffic Speed Deflectometer Device (TSDd), a device that allows for the characterization of the structural response of a pavement continuously and at traffic speed. The present study sought to evaluate the repeatability of the results obtained with the TSDd Falkorr® equipment in relation to the minimum requirements of the DNIT STANDARD 440/2023 – PRO for continuous structural assessment of pavements. The results in terms of deflection under load (average R^2 of 0.981) and in terms of curvature index (average R^2 of 0.983) demonstrated full compliance with the standards. Therefore, it is concluded that Falkorr presented satisfactory conditions of internal repeatability of the system for both parameters (maximum deflection and modeled curvature index) and in accordance with the DNIT standard. That consists in an innovation that brings advances not only technically but also in relation to road safety in pavement evaluations.

KEY WORDS: traffic speed deflectometer device (TSDd), continuous deflection, deflection slope, repeatability, road safety.

¹ RoadRunner, felipe.camargo@rrunner.com.br; caio.raul@rrunner.com.br; andre.vale@rrunner.com.br.

² EcoRodovias, cecilia.merighi@ecorodovias.com.br, claudio.dias@ecorodovias.com.br; danilo.pitta@ecorodovias.com.br.



DOI: [10.29327/1430212.49-13](https://doi.org/10.29327/1430212.49-13)

ESTUDO DE REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS DEFLECTOMÉTRICOS
REALIZADOS COM O TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER DEVICE (TSDd) NO BRASIL

INTRODUÇÃO

A avaliação estrutural de um pavimento busca determinar a sua capacidade de resistir às cargas, compreendendo o estudo das características de resistência e de deformabilidade de suas camadas. Dados referentes à adequabilidade estrutural do pavimento são essenciais para determinar o diagnóstico da qualidade global da estrutura. Este tipo de avaliação permite detectar regiões com maiores concentrações e/ou probabilidade de problemas, determinar as causas mais prováveis das manifestações de ruína do pavimento, e conseqüentemente, definir as ações necessárias à sua recuperação e manutenção.

Desde a percepção de que o problema de capacidade de carga de pavimentos deve-se também à deformabilidade elástica das camadas, a determinação desta característica por ensaios não-destrutivos vem desempenhando papel preponderante na busca da racionalização da análise e projeto dessas estruturas. Entre os ensaios não-destrutivos (NDT) estão incluídos os defletores, que consistem em medições dos deslocamentos verticais recuperáveis na superfície do pavimento quando submetido à aplicação de cargas transientes. Atualmente, a medida de deflexões do pavimento continua sendo o único método não-destrutivo confiável para determinar a condição estrutural dos pavimentos (Huang et al., 2022).

Avaliações de deflexões por ensaios não destrutivos já fazem parte da rotina do mercado de infraestrutura quando falamos de avaliação estrutural de pavimentos. Este tipo de ensaio se iniciou na década de 1950, com o emprego da viga Benkelman e teve evolução importante na década de 1980 com o advento dos equipamentos do tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Todavia, em todos estes casos, a sistemática de ensaio e baixa produtividade desses equipamentos exigem a interdição de faixa para a caracterização da deflexão do pavimento, com interferência direta com os usuários.

A mudança deste paradigma ocorre agora com a possibilidade de emprego de um *Traffic Speed Deflectometer Device* (TSDd), um equipamento que permite caracterizar a resposta estrutural de um pavimento de forma contínua e em velocidade de tráfego. Esta mudança está em consonância com a Organização Mundial da Saúde (OMS) que instituiu a década de ação pela segurança no trânsito 2021-2030 com a meta de redução de 50% nas mortes e lesões no trânsito neste período.

O TSDd é um equipamento que vem sendo desenvolvido desde 1990 com um primeiro protótipo na Dinamarca (Zofka e Sudyka, 2015), com o objetivo de medir deformações nos pavimentos na velocidade do tráfego. Comparado a outros métodos de aferição das deflexões nos pavimentos mais comuns no Brasil, como Viga Benkelman e FWD, o TSDd possui a vantagem de não exigir um levantamento estático, evitando assim fechamento/interrupção de faixas e conseqüentemente oferecendo mais segurança aos operadores e usuários, além de uma maior agilidade na execução dos levantamentos. O levantamento dinâmico permite a operação da rodovia em velocidades de operação da rodovia com registros detalhados da condição estrutural em grandes extensões por dia. Em comparação com as primeiras versões do equipamento, atualmente o TSDd possui uma melhor repetibilidade dos dados, menor variação da calibração e melhor previsão das deformações (Ferne et al., 2015). Já existem diversos estudos afirmando que o TSDd possui utilização comprovada em malhas rodoviárias, sendo utilizado para levantamento das condições defletores em diversos países como Reino Unido (Ferne et al., 2012), Polônia (Sudyka et al., 2021), Austrália (Muller, 2015) e Estados Unidos (Huang et al., 2022; Elseifi e Zihan, 2018).

Esta evolução na forma de medição de deflexão (dinâmica, contínua e sem interferência com o tráfego) por meio do emprego do TSDd chegou ao Brasil em 2023, ano em o meio técnico



brasileiro vivenciou três fatos relevantes: um experimento do DNIT de avaliação de aproximadamente 12.000 km realizado nos primeiros meses do ano; a publicação da norma nacional para execução deste tipo de ensaio; e a chegada e entrada em operação do Falkorr®, o primeiro TSDd de uma empresa latino-americana (figura 1).



Figura 1. Equipamento TSDd disponível no Brasil desde 2023

OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

O objetivo primordial deste trabalho foi avaliar a repetibilidade dos resultados obtidos com o equipamento Falkorr® em relação aos requisitos mínimos da norma NORMA DNIT 440/2023 – PRO para avaliação estrutural contínua de pavimentos utilizando um equipamento móvel. Apesar de haver diversos estudos na literatura internacional sobre TSDd's, ainda há uma carência de estudos em rodovias brasileiras para avaliar os resultados nas condições climáticas e de carregamento local.

Este tipo de estudo permite avaliar esta nova tecnologia disponível no meio técnico nacional de forma a se ter um suporte técnico para sua ampla utilização que implicará não apenas em benefícios técnicos mas também em termos de segurança viária, face a maior produtividade (menor tempo em pista) e eliminação da necessidade de desvio de tráfego.

MATERIAIS E MÉTODOS

O equipamento TSDd consiste basicamente em um sistema de lasers dopplers, de alta taxa de aquisição de dados, que são instalados em uma viga longa rígida dentro de um caminhão



[DOI: 10.29327/1430212.49-13](https://doi.org/10.29327/1430212.49-13)

ESTUDO DE REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS DEFLECTOMÉTRICOS
REALIZADOS COM O TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER DEVICE (TSDD) NO BRASIL

especialmente adaptado, o qual aplica a carga ao pavimento. Os sensores lasers medem o comportamento real que ocorre no pavimento devido a uma passagem de carga de um eixo comercial de 10 toneladas. Enquanto o caminhão está em movimento, o sistema doppler mede a inclinação das velocidades verticais e horizontais da superfície do pavimento, as quais são posteriormente numericamente integradas para se obter as bacias deflectométricas.

Como a caracterização estrutural com o Falkorr® ocorre na velocidade de tráfego de um caminhão se deslocando pela via, o equipamento permite caracterizar a deflexão de um pavimento:

- de forma contínua, e não amostral, em que pese o impacto que o espaçamento do FWD gera nos projetos de restauração de uma via, por exemplo (Oshima *et al.*, 2023);
- com grande acurácia, repetibilidade e reprodutibilidade (Muller, 2015; e Sudyka *et al.*, 2021);
- com elevada produtividade (Březina *et al.*, 2017), o que implica em menor tempo em pista para realização dos ensaios – e, portanto, menor exposição para os técnicos envolvidos nos ensaios e para os usuários das rodovias;
- sem a necessidade de operação de desvio do tráfego, ou seja, com menor interferência com os usuários e, portanto, maior segurança (e redução do nível de risco de ocorrerem acidentes).

Os resultados podem ser utilizados para monitoramento de vias, projetos de recuperação e planos de investimentos, caracterizando de forma mais precisa e eficiente os locais que efetivamente necessitam de intervenções estruturais. Há, ainda, benefícios para os usuários das rodovias, visto que os ensaios ocorrem sem a necessidade de desvios de tráfego (e a consequente redução de velocidade), implicando em melhor condição de deslocamento e menor exposição destes a riscos desnecessários de acidentes.

O princípio de medição está na caracterização da velocidade de deslocamento do pavimento com o emprego de diversos sensores laser doppler, capazes de verificar o movimento de um ponto através da mudança no comprimento de onda de um sinal. Ou seja, no Falkorr® os lasers emitem sinais conhecidos e captam a mudança destes após a sua reflexão pelo pavimento, caracterizando a velocidade de deslocamento da superfície pela mudança do comprimento de onda deste sinal. Com esta informação, determina-se a deflexão do pavimento sob a ação da carga do reboque onde está fixado o equipamento.



FELIPE FILIZZOLA CAMARGO, CAIO MASCARENHASRAUL,
CECILIA FORTES MERIGHI, DANILLO MARTINELLI PITTA,
CLAUDIO RENATO CASTRO DIAS, ANDRÉ FELIPE VALE

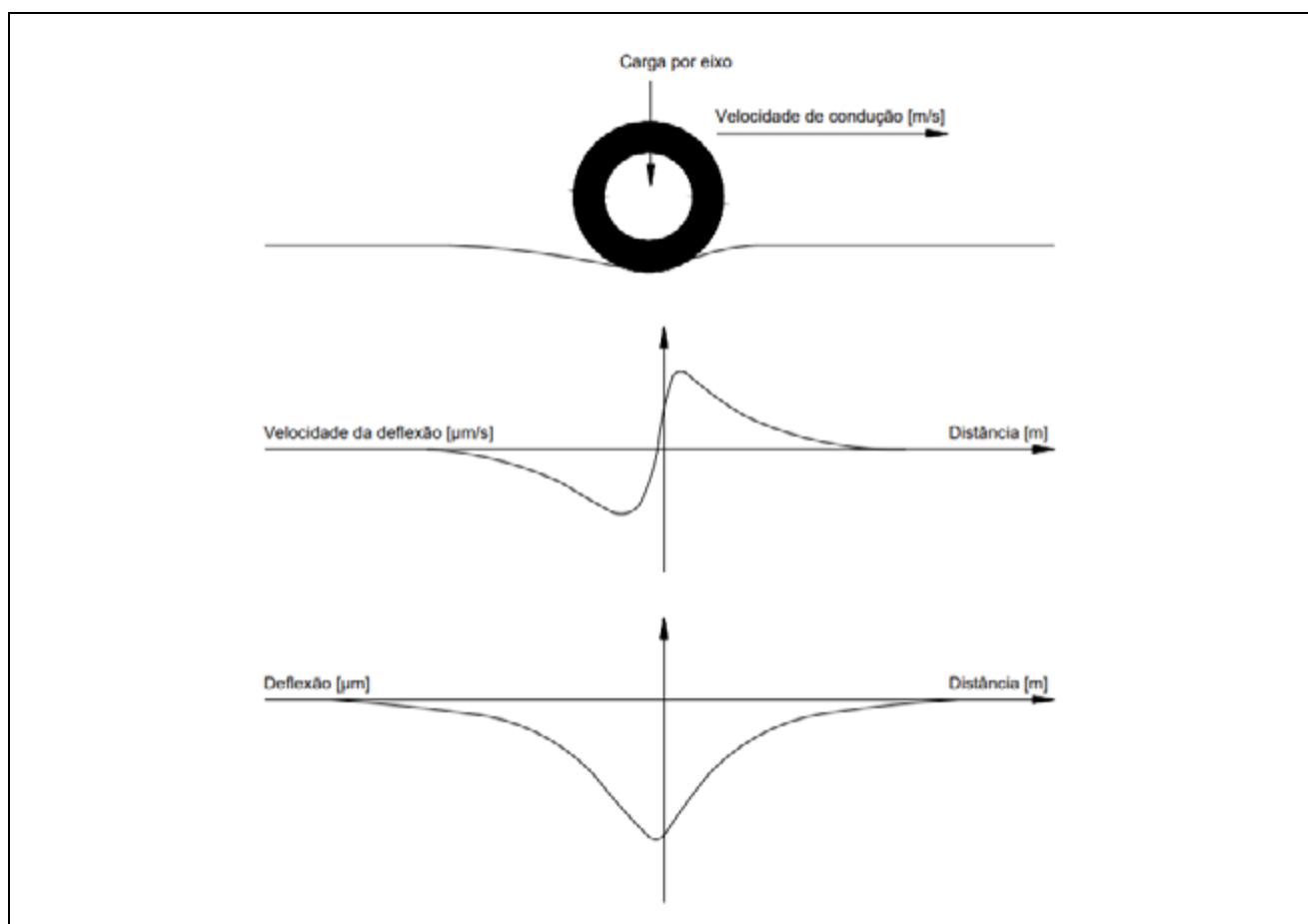


Figura 2. Princípio de funcionamento do Falkorr®

Há sensores laser antes e após a carga de roda do reboque em que está posicionado o equipamento, permitindo a caracterização completa da bacia de deflexões. Complementarmente, há dispositivos de controle e registro de temperaturas, pressão dos pneus, hodômetro de alta precisão e GPS, permitindo a caracterização completa dos demais parâmetros que influem na condição de ensaio deflectométrico. Outros sistemas, como o PavScan®, sistemas de imageamento e georadar (GPR), podem ser sincronizados com o equipamento para que a coleta de dados ocorra de forma unificada e integrada em uma única passagem, atendendo à normativa do DNIT para este tipo de ensaio (DNIT, 2023), como ilustrado a seguir (Figura 3).



DOI: 10.29327/1430212.49-13

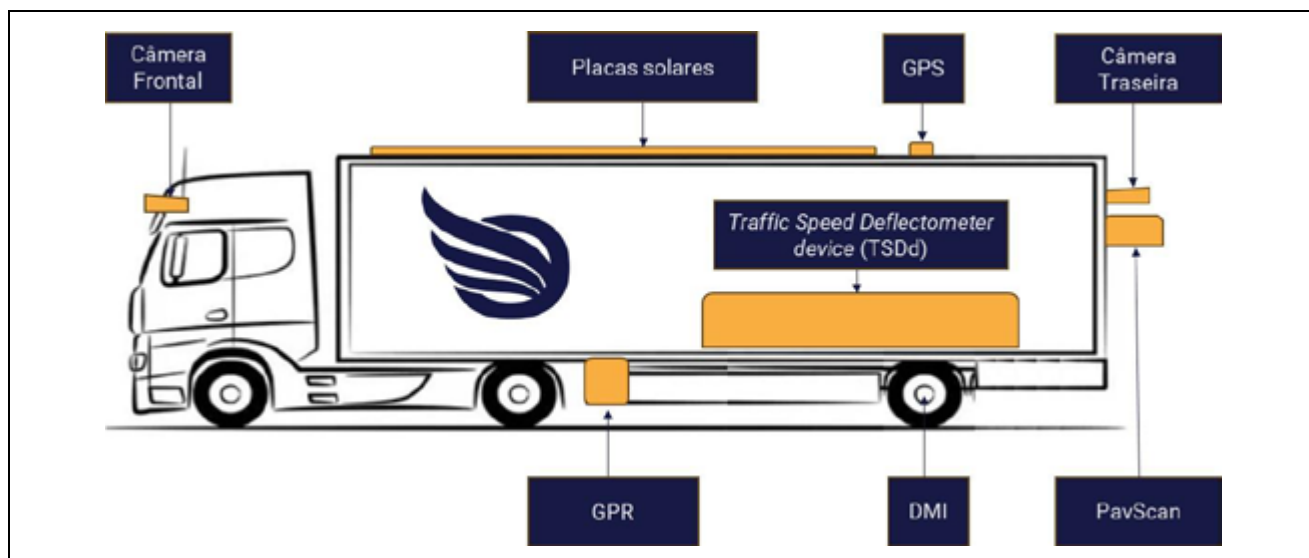
ESTUDO DE REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS DEFLECTOMÉTRICOS
REALIZADOS COM O TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER DEVICE (TSDD) NO BRASIL

Figura 3. Configurações possíveis do Falkorr

METODOLOGIA

A avaliação da repetibilidade do equipamento Falkorr® para medição da condição estrutural dos pavimentos foi realizada empregando a metodologia de validação estrutural preconizada na normativa de procedimento de levantamento estrutural e funcional utilizando equipamento móvel DNIT 440/2023-PRO. Para o presente estudo, optou-se por utilizar somente o módulo de avaliação estrutural, tendo em vista que o PavScan® vem sendo utilizado no Brasil há mais de uma década com resultados satisfatórios. Na figura 4 estão descritas as etapas consideradas.

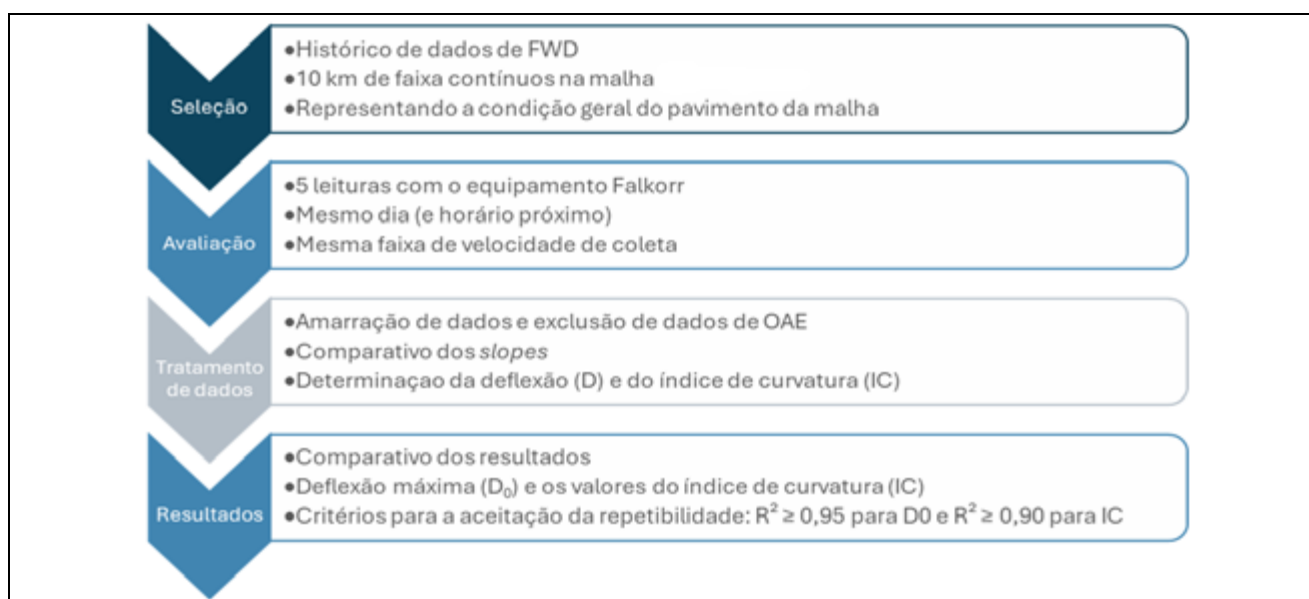


Figura 4. Fluxograma das etapas do estudo



Inicialmente, foi selecionado um trecho teste de rodovia situado na malha rodoviária concedida com um total de 10 km de faixa contínuos, tendo como base o histórico de avaliações que vem sendo realizadas com ensaios deflectométricos com FWD. A partir da análise estatística dos resultados deflectométricos levantados com o FWD na campanha de monitoramento de 2023, foi possível analisar o comportamento estrutural e a distribuição de deflexões representativa da malha rodoviária sob análise. Na sequência, buscou-se selecionar um segmento de faixa contínuo, com poucas interferências, que possibilitasse o levantamento das cinco passagens do equipamento Falkorr®, em um curto intervalo de tempo, de forma a minimizar possível fatores externos (como por exemplo variação de temperatura/umidade), e que tivesse uma distribuição geral de deflexões que representasse bem a condição geral da malha em questão.

A Tabela 1 apresenta as condições estatísticas da malha viária em questão e as condições estatísticas do segmento de 10 quilômetros eleito para avaliação com o Falkorr®.

Tabela 1. Parâmetros representativos da malha e do trecho teste, em termos de deflexão

Parâmetro	Malha Concessionada	Trecho Teste (10 km)
Média	$27,6 \times 10^{-2}$ mm	$28,5 \times 10^{-2}$ mm
Mediana	$24,4 \times 10^{-2}$ mm	$24,4 \times 10^{-2}$ mm
1º Quartil	$34,0 \times 10^{-2}$ mm	$33,6 \times 10^{-2}$ mm
3º Quartil	$18,5 \times 10^{-2}$ mm	$20,4 \times 10^{-2}$ mm

A partir dos dados levantados em campo, determinou-se a inclinação das velocidades de deslocamento da superfície dos pavimentos (*deflection slopes*) e posterior determinação da deflexão e índices de curvatura (IC), além de serem registradas as informações da temperatura ambiente e da superfície do pavimento e coordenadas GPS, bem como data e hora dos ensaios. Optou-se por utilizar a inclinação dos deslocamentos (*deflection slopes*) para evitar a dependência dos dados na velocidade do veículo, onde a velocidade de deslocamento é dividida pela velocidade instantânea do veículo para se obter uma medida da inclinação de deslocamento (Ferne *et al*, 2008). A velocidade de deslocamento é medida em mm/s e a velocidade do levantamento em m/s, resultando, portanto, em medidas de inclinação de deslocamento em mm/m.

Os registros foram obtidos avaliados compilados em valores médios a cada 10m e 100m, associando-se às informações complementares, tais como:

- Identificação do local de ensaio, velocidade de coleta e observações pertinentes;
- Dados de inclinação de deslocamento de cada um dos treze sensores laser Doppler, posicionados a -450, -200, -100, 100, 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500, 2000 mm do eixo traseiro, apresentadas em $\mu\text{m}/\text{m}$;
- Temperatura do ar e do pavimento, em °C;
- Deflexão determinada a 0 e a 200 m do eixo traseiro (D_0 e D_{20});
- Data e hora do ensaio;
- Informações do GPS.

De forma ilustrativa, tem-se na Figura 5, os gráficos do perfil das inclinações de deslocamento registradas a 200 mm do eixo de carga do equipamento nas cinco passagens do equipamento.



DOI: [10.29327/1430212.49-13](https://doi.org/10.29327/1430212.49-13)

ESTUDO DE REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS DEFLECTOMÉTRICOS
REALIZADOS COM O TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER DEVICE (TSDD) NO BRASIL

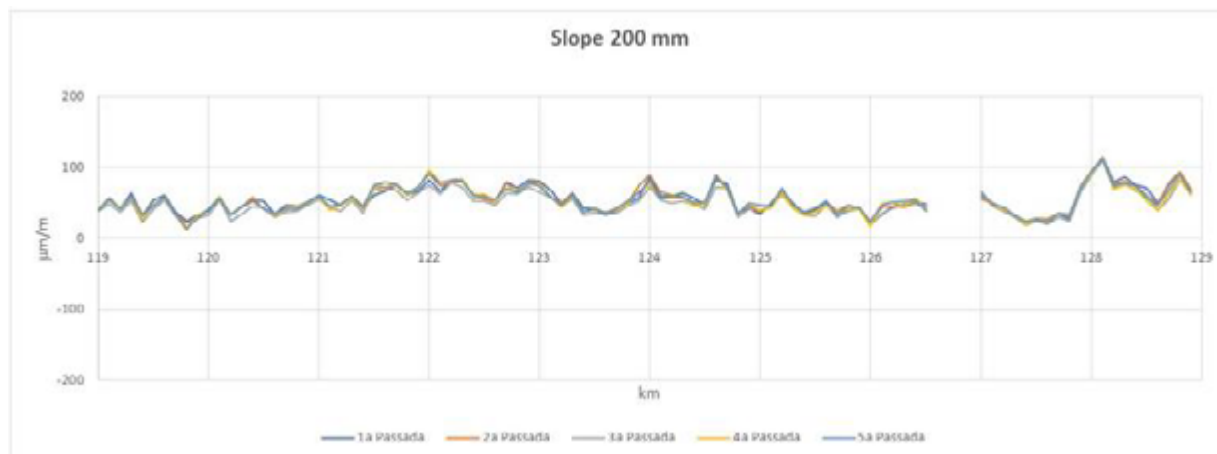


Figura 5. Exemplo de inclinação de deslocamento (slope) a 200 mm do eixo da carga

Nas Figuras 6 e 7, temos imagens do equipamento Falkorr® em operação durante os levantamentos em questão, que se deram em apenas um dos períodos do dia e ocorreram sem nenhuma interferência com os usuários da rodovia e sem exposição para os trabalhadores envolvidos na realização dos ensaios.



Figura 6. Imagens do Falkorr® em operação em velocidade de tráfego na SP-070



FELIPE FILIZZOLA CAMARGO, CAIO MASCARENHASRAUL,
CECILIA FORTES MERIGHI, DANILO MARTINELLI PITTA,
CLAUDIO RENATO CASTRO DIAS, ANDRÉ FELIPE VALE



Figura 7. Apresentação do equipamento Falkorr® em área de refúgio de base de balança móvel na SP-070 antes da avaliação do trecho teste

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados foram comparados de forma estatística para a avaliação da repetibilidade dos resultados, conforme previsto na norma DNIT 440/2023-PRO. Usando os mesmos conjuntos de cinco execuções, a repetibilidade interna do sistema foi avaliada comparando cada execução com os valores médios de 100 m. A comparação foi realizada para a deflexão máxima modelada (D_0) e o índice de curvatura (IC) com os valores médios de 100 m. Os critérios para a aceitação da repetibilidade interna são $R^2 \geq 0,95$ e $R^2 \geq 0,90$, para os valores de deflexão máxima e índice de curvatura modelados, respectivamente. Os resultados da avaliação de repetibilidade interna do sistema são apresentados na sequência (Tabela 2) para a deflexão máxima modelada.

Tabela 2. Avaliação de repetibilidade interna do sistema em termos de R^2 da Deflexão Máxima

Passada	1	2	3	4	5
1	1				
2	0,98	1			
3	0,98	0,98	1		
4	0,97	0,99	0,98	1	
5	0,97	0,98	0,98	0,99	1

DOI: [10.29327/1430212.49-13](https://doi.org/10.29327/1430212.49-13)

ESTUDO DE REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS DEFLECTOMÉTRICOS
REALIZADOS COM O TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER DEVICE (TSDD) NO BRASIL

Como se pode observar, os resultados obtidos foram satisfatórios ($R^2 \geq 0,95$), sendo que o valor médio do R^2 foi de 0,981. Os resultados da avaliação de repetibilidade interna do sistema são apresentados na sequência para o índice de curvatura (IC) – diferença entre a deflexão sob a carga e a 200 mm da mesma.

Tabela 3. Avaliação de repetibilidade interna do sistema em termos de R^2 do Índice de Curvatura

Passada	1	2	3	4	5
1	1				
2	0,98	1			
3	0,97	0,98	1		
4	0,97	0,99	0,99	1	
5	0,97	0,98	0,99	0,99	1

Como se pode observar, os resultados obtidos foram satisfatórios ($R^2 \geq 0,90$), sendo que o valor médio do R^2 foi de 0,983. Sendo assim, conclui-se que o Falkorr® apresentou condições satisfatórias de repetibilidade interna do sistema para ambos os parâmetros (deflexão máxima e índice de curvatura modelados) e em concordância com a norma do DNIT.

RESUMO E CONCLUSÃO

O presente documento apresentou o estudo de repetibilidade dos ensaios deflectométricos realizados de forma contínua com o *Traffic Speed Deflectometer Device* (TSDd) Falkorr®. Nesta etapa, constatou-se que o Falkorr® apresentou resultados adequados em termos de repetibilidade em conformidade com as exigências da norma DNIT 440/2023-PRO - Levantamento funcional e estrutural contínuo de pavimentos utilizando um equipamento móvel.

Após a consolidação dos dados das cinco passagens do equipamento pelo trecho constatou-se que:

- Os resultados em termos de deflexão sob a carga indicam um R^2 médio de 0,981, superior ao exigido em norma, de $R^2 \geq 0,95$;
- Em termos de índice de curvatura (IC) o valor médio do R^2 foi de 0,983, também atendendo a exigência da norma do DNIT, de $R^2 \geq 0,90$.

Sendo assim, conclui-se que o Falkorr apresentou condições satisfatórias de repetibilidade interna do sistema para ambos os parâmetros (deflexão máxima e índice de curvatura modelados) e em concordância com a norma do DNIT e que esta tecnologia de realização de ensaios deflectométricos de forma contínua e em velocidade de tráfego é efetiva e está operacional no Brasil.



REFERÊNCIAS

- Březina I., Stryk K., Grošek J. Using traffic speed deflectometer to measure deflections and evaluate bearing capacity of asphalt road pavements at network level. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Volume 236, 2017
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. NORMA DNIT 440/2023 – PRO: Pavimentação – Levantamento funcional e estrutural contínuo de pavimentos utilizando um equipamento móvel – Procedimento. Rio de Janeiro: IPR, 2023.
- Ferne B. W., P. Langdale, N. Round, & R. Fairclough. Development of a calibration procedure for the UK Highways Agency Traffic Speed Deflectometer. Presented at the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2008.
- Ferne B. W., Drusin S., Baltzer S., Langdale P., Meitei B. UK Trial to compare 1st and 2nd Generation Traffic Speed Deflectometers. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlim, Alemanha, 2015
- Huang B., Zhang M., Gong H., Polaczyk P. Evaluation of Traffic Speed Deflectometer for Collecting Network-Level Pavement Structural Data in Tennessee. Final Report. Department of Civil and Environmental Engineering. The University of Tennessee, Knoxville. No RES2020-08, 2022
- Muller W. A comparison of TSD, FWD and GPR field measurements. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlim, Alemanha, 2015
- Oshima, S., Louzane, G., Camargo, F. F., & Vale, A. F. O impacto do espaçamento do FWD em projetos de restauração. Artigo Científico, v 2, 2023.
- Sudyka J., Harasim P., Kowalska-Sudyka M, Mechowski T. Quality control of traffic speed deflectometer measurements on road network. Roads and Bridges 20. P 441 – 450, 2021
- Zofka A., Sudyka J. Traffic Speed Deflectometer (TSD) Measurements for Pavement Evaluation. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlim, Alemanha, 2015



Particularização do Fator de Ajustamento das Deflexões em Função da Temperatura para Projetos de Restauração de Pavimentos

Rodrigo Malysz¹
Valter de Oliveira Bochi¹
Natália Guterres Mensch¹
Kethelin Eloisa Klagenberg Beckert¹
Diêgo de Almeida Pereira²

RESUMO

O comportamento elástico de pavimentos é usualmente avaliado por meio de deflexões, que podem ser medidas em campo, principalmente com a utilização de viga Benkelman ou FWD – Falling Weight Deflectometer. Tais deflexões são tão mais influenciadas pela temperatura, quanto mais espesso for o revestimento asfáltico. Assim, verifica-se a importância de considerar as deflexões para uma temperatura que melhor represente a situação em que a rodovia opera, adequada aos parâmetros ambientais locais. Em se tratando o Brasil de um país com dimensões continentais, é natural se esperar diferenças significativas nas temperaturas a que as rodovias são submetidas. Também, dependendo da região, as temperaturas podem variar significativamente ao longo do ano, ou apresentar uma maior constância. De forma geral, os resultados dos levantamentos deflectométricos têm sido comumente corrigidos para 25° C, que pode ou não representar bem as condições de operação do pavimento, dependendo da região em que se encontra. Assim, este estudo tem o objetivo de propor uma particularização do fator de ajustamento das deflexões em função da temperatura do revestimento asfáltico. Para isso, foram propostas correlações entre a temperatura do ar e a temperatura do revestimento asfáltico, ambas medidas pelo equipamento FWD. Para demonstrar o método, foram escolhidos dois trechos de comportamentos opostos, um de clima quente (Cuiabá/MT) e outro de clima frio (Caxias do Sul/RS). Utilizando as médias das temperaturas máximas do ar de cada local, foi estimada a temperatura do revestimento asfáltico para aquelas condições, a qual foi denominada temperatura crítica de operação do pavimento (T_{CROP}). Uma vez definida tal temperatura, o gráfico de correção das deflexões a partir da temperatura do revestimento asfáltico, adotado pela DER/SP IP-DE-P00/003, foi particularizado de forma a ajustar as deflexões, não mais para a temperatura de 25°C e sim para a temperatura crítica de operação do pavimento.

PALAVRAS-CHAVE: Deflexões, Temperaturas, Fator de Ajustamento.

ABSTRACT

The elastic behavior of pavements is typically assessed through deflections, which can be measured in the field, mainly using the Benkelman beam or FWD (Falling Weight Deflectometer). Such deflections are more influenced by temperature the thicker the asphalt coating. Thus, it is important to consider deflections for a temperature that represents the operational condition of the roadway, suitable for local environmental parameters. Considering Brazil's continental dimensions, significant differences in the temperatures to which roadways are subjected can be expected. Also, depending on the region, temperatures may vary significantly throughout the year or exhibit greater consistency. Generally, the results of deflectometric surveys have commonly been adjusted to 25°C, which may or may not accurately represent the pavement's operating conditions, depending on the region. Therefore, this study aims to propose a customization of the deflection adjustment factor based on the temperature of the asphalt coating. For this purpose, correlations between air temperature and asphalt coating temperature, both measured by the FWD equipment, were proposed. To demonstrate the method, two sections with opposite behaviors were chosen, one with a hot climate (Cuiabá/MT) and the other with a cold climate (Caxias do Sul/RS). Using the average maximum air temperatures of each location, the asphalt coating temperature for those conditions was estimated, which was called the Critical Pavement Operating Temperature (CPOT). Once this temperature was defined, the deflection adjustment graph based on the asphalt coating temperature, adopted



by DER/SP IP-DE-P00/003, was customized to adjust the deflections, not only to the 25°C temperature but to the critical pavement operating temperature.

KEY WORDS: Deflections; Temperature; Adjustment Factor.

¹ Ecoplan Engenharia, e-mail: rodrigo.malysz@ecoplan.com.br; valterbochi@gmail.com; natalia.mensch@gmail.com; klagenberg.eng@gmail.com.

² DNIT, diego.almeida@dnit.gov.br.

INTRODUÇÃO

O comportamento elástico de pavimentos é usualmente avaliado por meio de deflexões, que podem ser medidas em campo, principalmente com a utilização de viga Benkelman ou *Falling Weight Deflectometer* (FWD). As deflexões são tão mais influenciadas pela temperatura, quanto mais espesso for o revestimento asfáltico. Assim, verifica-se a importância de considerar as deflexões para uma temperatura que represente a situação em que o pavimento opera, adequada aos parâmetros ambientais locais.

Parâmetros como deflexões e temperaturas estão fortemente ligados à vida de serviço do pavimento, seja relacionado ao fenômeno de fadiga, seja relativo às deformações permanentes das misturas asfálticas.

Em se tratando o Brasil de um país com dimensões continentais, é natural se esperar diferenças significativas na temperatura de operação das rodovias. Também, dependendo da região as temperaturas podem variar significativamente ao longo do ano, caso em que pode ser mais interessante trabalhar com um conceito de temperatura crítica.

Neste contexto, a definição da temperatura para a qual as deflexões serão corrigidas, no âmbito dos projetos de restauração, é de fundamental importância para a representatividade dos parâmetros de projeto e da efetividade das soluções de restauração.

De forma geral, os resultados dos levantamentos deflectométricos têm sido corrigidos para 25° C, que pode ou não representar bem as condições de operação do pavimento, dependendo da região em que se encontra.

Assim, este estudo tem o objetivo de propor uma particularização do fator de ajustamento das deflexões em função da temperatura do revestimento asfáltico.

Para atingir o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a relação entre a temperatura do ar e a temperatura do revestimento asfáltico em diversos trechos com diferentes características;
- Estabelecer a temperatura de referência em função do local em que o levantamento deflectométrico foi realizado;
- Propor uma metodologia para a particularização do fator de ajustamento das as deflexões em função da temperatura.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Balbo (2007) e Pinto & Preussler (2002) comentam sobre as temperaturas dos pavimentos no Brasil, especialmente no que se refere ao estudo de Motta (1991). Os trabalhos destacam a importância de se conhecer o comportamento do clima no local de trabalho, citando as normais climatológicas do INMET como uma referência fundamental.



DOI: [10.29327/1430212.49-6](https://doi.org/10.29327/1430212.49-6)

PARTICULARIZAÇÃO DO FATOR DE AJUSTAMENTO DAS DEFLEXÕES
EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS

Pinto & Preussler (2002) citam investigações de campo realizadas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias, na época do extinto DNER, em 53 trechos de rodovias federais (entre 1979 e 1984) mostraram que as deflexões medidas com a viga Benkelman eram pouco afetadas pelas mudanças das estações climáticas. No entanto, é importante observar que se trata de uma constatação de muitos anos atrás em que as características dos revestimentos asfálticos, especialmente no que se refere às espessuras usuais, eram diferentes das atuais.

As temperaturas mais frequentes situam-se na faixa de 20 a 40°C e em estados como o Rio de Janeiro não são normalmente encontradas temperaturas inferiores à 10°C, conforme destacado por Balbo (2007). Neste contexto, a possibilidade de congelamento é nula e a principal preocupação com as misturas asfálticas no Brasil se refere às altas temperaturas.

Outros estudos, como os de Vieira (2002) e Gonçalves (2002), avaliaram temperaturas medidas a 5 e a 9 cm de profundidade no revestimento asfáltico. Os autores correlacionaram as temperaturas do revestimento nas profundidades mencionadas com a temperatura do ar e a irradiação solar, medidas a partir de uma estação meteorológica instalada nas imediações das pistas experimentais utilizadas nas pesquisas.

O efeito da condição climática em profundidade foi estudado por Souza *et al.* (2019), em pavimentos com elevadas espessuras de misturas asfálticas, chegando a 47 cm de misturas asfálticas. Foi observada a influência da temperatura do ar, da umidade e da radiação solar no comportamento das temperaturas do pavimento, tendo uma relação mais direta com a temperatura do ar. Os autores concluem que a melhor forma de modelar o gradiente térmico no pavimento é dividindo o comportamento diário em ciclos de aquecimento e resfriamento.

O modelo linear de previsão da temperatura do revestimento asfáltico em função da temperatura do ar, conforme apresentado na Equação (1), foi utilizado por Motta (1991).

$$T_{rev} = a + b \cdot T_{ar} \quad (1)$$

Onde:

- T_{rev} é a temperatura do pavimento (°C);
- T_{ar} é a temperatura do ar (°C) e
- a e b são fatores de ajuste da equação.

No entanto, anteriormente, Motta (1979) já destacava as dificuldades em se caracterizar a temperatura de revestimentos asfálticos. Conclui que as temperaturas de superfície respondem muito rapidamente às variações das condições meteorológicas, o que não acontece em profundidades de 5 cm ou mais. Ainda, o revestimento asfáltico como um todo encontra-se menos aquecido pela manhã e mais aquecido à tarde. Tendo em conta que a temperatura de superfície varia rapidamente seja qual for a hora do dia, a caracterização do comportamento da camada torna-se uma tarefa complexa.

Assim, os diversos trabalhos verificaram que a medição de temperaturas em profundidade ameniza o gradiente térmico, trazendo maior representatividade aos modelos. Por outro lado, a medição em superfície traz maior praticidade e uma grande quantidade de dados.

A padronização das deflexões em função da temperatura é usualmente realizada com o modelo obtido por Andreatini (1988), apresentado na Figura 1 e constante na publicação DER/SP IP-DE-P00/003, que corrige a temperatura do pavimento para 25°C.

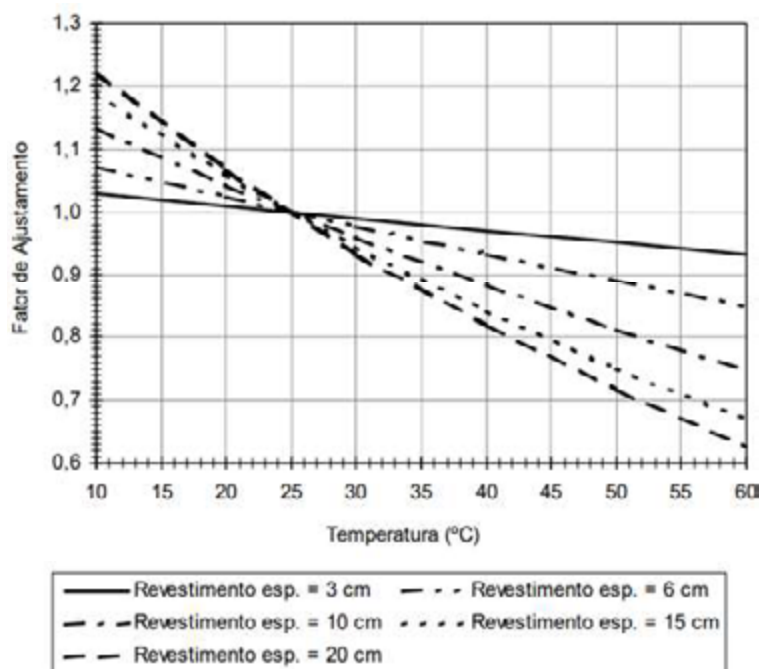


Figura 1: Fator de Correção da Deflexão em Função da Temperatura do Revestimento Asfáltico (DER/SP IP-DE-P00/003)

A variação das temperaturas ao longo da espessura do revestimento asfáltico foi caracterizada no trabalho de Moraes (2015). O experimento contou com leituras de temperaturas utilizando diversos equipamentos e em diversas profundidades no revestimento asfáltico. Foi observado que as leituras de temperatura feitas pelo equipamento FWD tendem a ser inferiores às medidas por termopares ou termômetro infravermelho. As temperaturas nas maiores profundidades variam menos ao longo do dia, de forma que entre as 9 e as 17 horas se mostraram inferiores às da superfície. Também, foi observado que a temperatura máxima na superfície ocorre por volta das 14 horas.

O estudo de Bueno (2016) avaliou os módulos de resiliência retroanalizados a partir de bacias deflectométricas obtidas com FWD. Os resultados mostraram que a determinação da rigidez das camadas granulares e do subleito dispensam ajustes nas bacias de campo. Por outro lado, o módulo de resiliência do revestimento se mostrou dependente da temperatura, demandando um procedimento iterativo para a sua determinação. O autor entende como necessário, um procedimento de correção das deflexões em função da temperatura, mais adaptado ao cenário nacional.

METODOLOGIA

Esta proposta de particularização do fator de ajustamento das deflexões em função da temperatura, passa pela definição de uma correlação entre as temperaturas do ar e do revestimento asfáltico, pela definição de uma temperatura representativa das condições de operação do pavimento e, por fim, considerando que o DNIT/IPR-720/2006 não apresenta recomendações quanto à essa questão, pela adaptação das curvas de ajustamento recomendadas pela DER/SP IP-DE-P00/003. Para este artigo foram selecionados dois trechos com características opostas: um nas proximidades de Cuiabá/MT de clima quente e outro nas proximidades de Caxias do Sul/RS de clima frio.



DOI: 10.29327/1430212.49-6

PARTICULARIZAÇÃO DO FATOR DE AJUSTAMENTO DAS DEFLEXÕES
EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS

A correlação entre a temperatura do ar e a temperatura do pavimento foi estabelecida com base nos dados de levantamentos deflectométricos realizados conforme o DNER-PRO 273/96 com FWD. Tal equipamento, entre os dados obtidos, apresenta a medição da temperatura do ar e do revestimento asfáltico para cada estação de ensaio. Assim, a partir destes dados, foram estabelecidas correlações lineares entre os referidos parâmetros, sendo uma geral, considerando resultados obtidos em trechos diversos ao longo do país e outras específicas para o trecho em avaliação.

Uma vez que cada região do país apresenta características de climáticas diferentes, é proposto que a temperatura que melhor representa a situação em que o pavimento opera seja obtida a partir das médias das máximas. Os registros históricos de temperaturas foram obtidos em INMET (2023), neste caso em específico para as temperaturas máxima mensal e anual, neste caso em específico para as temperaturas máximas mensal e anual.

Utilizando a temperatura média das máximas anual de cada região como parâmetro de entrada na correlação entre a temperatura do ar e do pavimento, foi estimada qual seria a temperatura do revestimento asfáltico correspondente àquela temperatura do ar estabelecida como média das máximas anual. Esta temperatura foi denominada neste artigo de temperatura crítica de operação do pavimento (T_{CROP}).

De forma a facilitar as análises, foi realizada uma aproximação matemática dos valores do fator de ajustamento em função da espessura e temperatura do revestimento, conforme estabelece o modelo de Andreatini (1988), obtido conforme a equação (2) e as suas variáveis definidas pelas equações (3), (4) e (5). Tal equação estabelece o fator de ajustamento das deflexões especificamente da temperatura para a qual as deflexões foram medidas para a temperatura de 25°C. Este artigo propôs uma adequação de forma a estabelecer os fatores de ajustamento para temperaturas diversas, em especial para a temperatura crítica de operação do pavimento.

$$Fa = a * e^{b*T} - c \quad (2)$$

Sendo:

$$a = 0,0207h + 1 \quad (3)$$

$$b = 0,0049 - 0,006 \ln(h) \quad (4)$$

$$c = a * e^{25*b} - 1 \quad (5)$$

Onde:

- a , b e c são fatores de ajuste da equação;
- h é a espessura do pavimento (cm);
- T é a temperatura do pavimento (°C);
- Fa = Fator de ajustamento da deflexão em função da temperatura do revestimento asfáltico.

A identificação do tipo de asfalto utilizado nas estruturas avaliadas não foi possível, de forma que essa consideração não faz parte do modelo proposto. Observa-se, porém, que, ainda que seja uma questão que traria mais detalhamento ao modelo e se refletindo em uma possível melhora nas definições obtidas, a identificação do tipo de ligante em campo não é prática e mesmo em laboratório pode ser de difícil obtenção.



ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURAS E DEFLEXÃO

A primeira definição necessária para as análises propostas é conhecer a relação entre a temperatura do ar e a temperatura do pavimento. Para isso foram analisados mais de 50.000 registros destas temperaturas, utilizando equipamento FWD, nos estados do RS, PR, MS, MT, GO, e MA. A relação estabelecida entre as variáveis é apresentada na Figura 2 e Equação (6). Tal relação, pode ser estabelecida especificamente para cada projeto, já que os equipamentos FWD contam com sensores para a medição e registro automático dessas temperaturas.

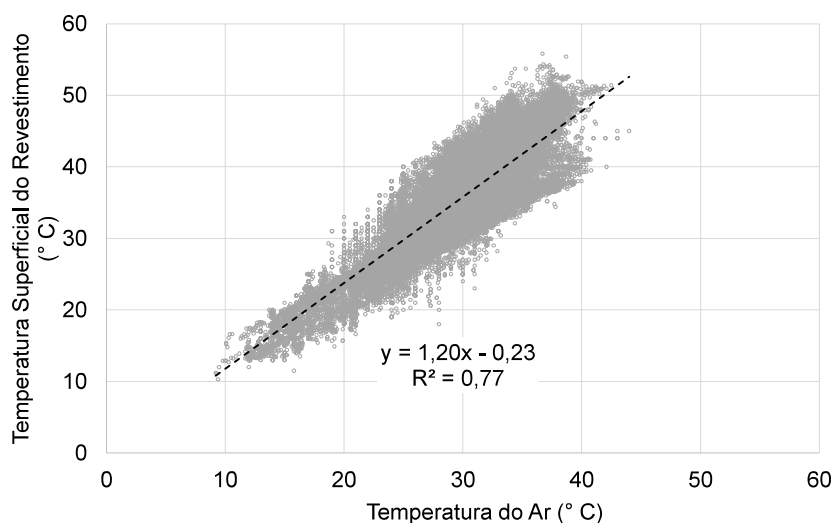


Figura 2 - Relação entre as temperaturas do ar e do revestimento asfáltico

$$T_{rev} = 1,20.T_{ar} - 0,23 \quad (6)$$

Onde:

- T_{rev} é a temperatura do revestimento asfáltico;
- T_{ar} é a temperatura do ar.

Estabelecida a relação entre as temperaturas, torna-se necessário conhecer o clima da região em que se está projetando. Para fins de exemplo, neste artigo serão consideradas duas regiões de climas opostos, a saber: Cuiabá/MT e Caxias do Sul/RS. Para tanto, foi utilizada a média das temperaturas máximas em cada mês, conforme a Figura 3, resultando em uma temperatura média das máximas anual (média das máximas dos meses) de 33,4° C. Este artigo propõe a utilização desta temperatura como a mais representativa do comportamento geral do pavimento, conforme já denominado anteriormente de temperatura crítica de operação do pavimento (T_{CROP}).



DOI: 10.29327/1430212.49-6

PARTICULARIZAÇÃO DO FATOR DE AJUSTAMENTO DAS DEFLEXÕES
EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS

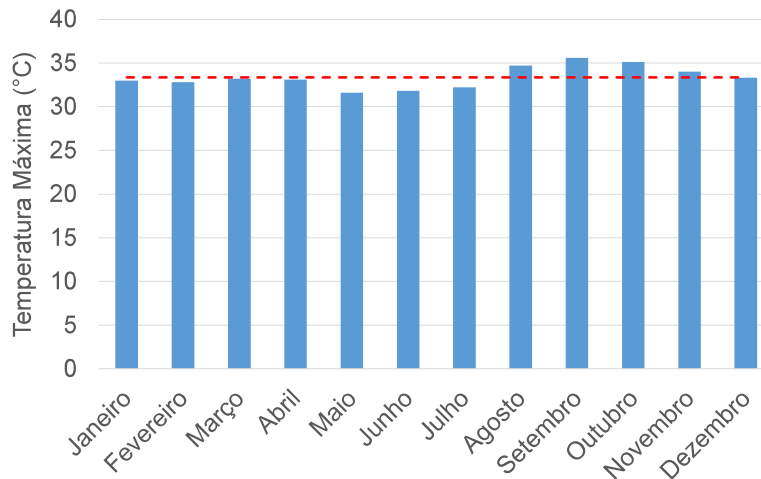


Figura 3 – Temperaturas máximas médias em Cuiabá/MT

Na Figura 4, os dados do levantamento considerado, na região de Cuiabá/MT, foram colocados em destaque. Observa-se que a correlação entre as temperaturas, conforme a Equação (7), difere ligeiramente da correlação geral, já apresentada pela Equação (6), porém, levando a uma diferença máxima de 3,9°C. De qualquer forma, é sempre desejável utilizar-se a correlação local, especialmente para uma extensão considerável de levantamento, em que se consiga obter um coeficiente de determinação adequado. Neste caso em específico, em que a temperatura máxima média para a região resultou 33,4°C, a correlação local levou a uma T_{CROP} correspondente a 41,4°C e a correlação geral à 39,9°C, demonstrando uma pequena diferença entre as metodologias.

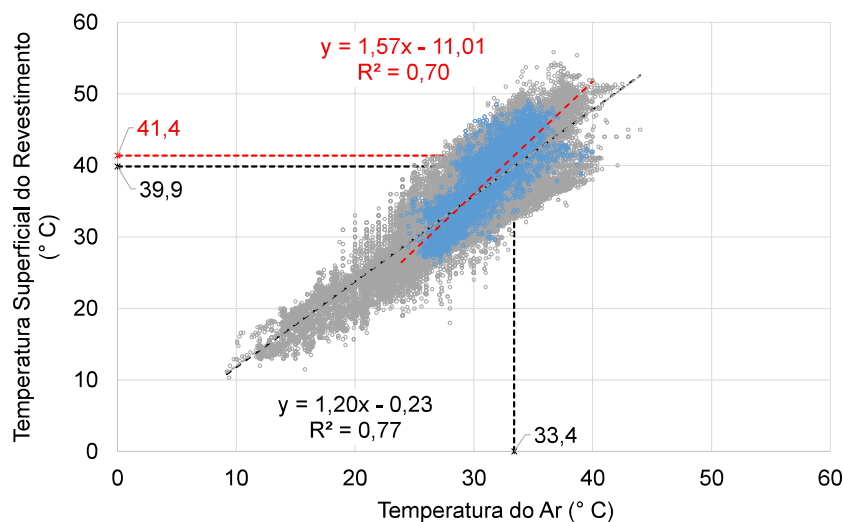


Figura 4 - Relação entre as temperaturas do ar e do revestimento asfáltico na região de Cuiabá/MT

$$T_{rev} = 1,57 \cdot T_{ar} - 11,01$$

(7)

Onde:

- T_{rev} é a temperatura do revestimento asfáltico;
- T_{ar} é a temperatura do ar.



Neste levantamento, os resultados obtidos para a temperatura do revestimento asfáltico, considerando-se a média mais o desvio padrão para todos os pontos medidos, resultou em 33,2°C para temperatura do ar e 41,8°C para o revestimento asfáltico, valores estes muito semelhantes às temperaturas de operação, conforme o procedimento proposto, confirmando a necessidade de avaliar os fatores de ajustamento de forma particularizada.

Considerando a correlação local e arredondando o resultado para nenhuma casa decimal, considera-se $T_{CROP} = 41^\circ\text{C}$ e que, para essa temperatura, o coeficiente de ajustamento das deflexões deve ser igual a 1,0. Então, propõe-se o deslocamento vertical das curvas da Figura 1, mantendo o mesmo formato de curva, de forma que suas ordenadas correspondam ao fator de ajustamento igual a 1,0 para a temperatura de 41°C, para todas as espessuras de revestimento. Os demais fatores, para outras temperaturas em cada espessura de revestimento, vão variar mantendo a proporção inicialmente estabelecida por Andreatini (1988).

Para a obtenção dos fatores de ajustamento adequados à temperatura de operação da rodovia, deve-se adequar a Equação (5), considerando não mais a temperatura de 25°C, mas sim a temperatura crítica de operação do pavimento, conforme apresenta a Equação (8). O resultado obtido é apresentado pela Figura 5.

$$c = a * e^{T_{crop}*b} - 1 \quad (8)$$

Onde:

- a , b e c são fatores de ajuste da equação;
- h é a espessura do revestimento asfáltico (cm);
- T_{CROP} é a temperatura crítica de operação do pavimento (°C).

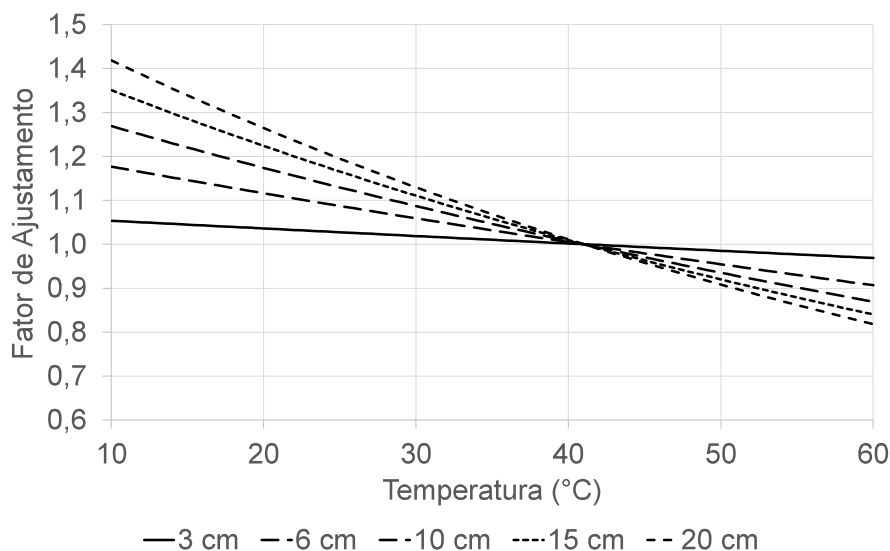


Figura 5 – Fatores de Ajustamento corrigidos para a Região de Cuiabá ($T_{CROP} = 41^\circ\text{C}$)

Para avaliar uma situação de clima oposto, foi selecionado um trecho nas proximidades do município de Caxias do Sul/RS, em que são esperadas temperaturas significativamente inferiores. No referido município, as temperaturas máximas médias são apresentadas pela Figura 6, na qual se verifica que, para o ano todo, a média das máximas resulta em 21,9°C.



DOI: 10.29327/1430212.49-6

PARTICULARIZAÇÃO DO FATOR DE AJUSTAMENTO DAS DEFLEXÕES
EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS

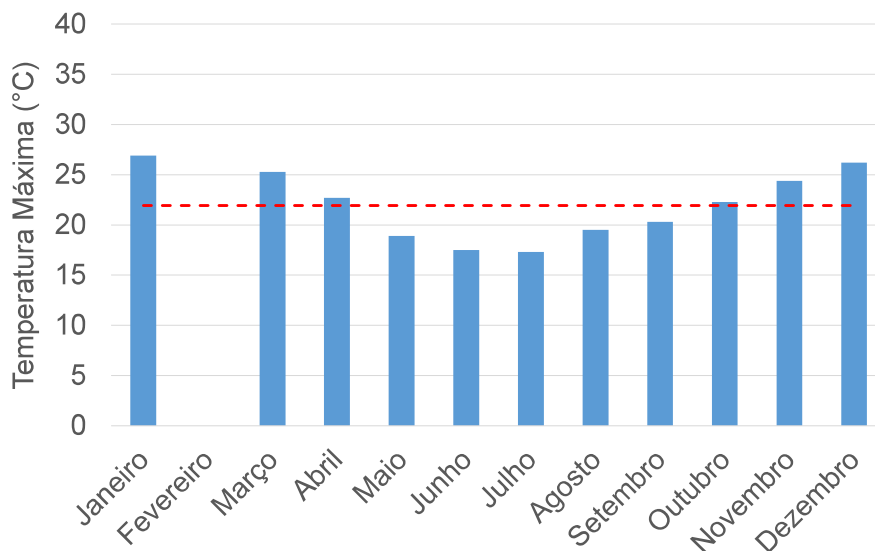


Figura 6 - Temperaturas máximas médias em Caxias do Sul/RS

As temperaturas do ar e do revestimento asfáltico, obtidas durante o levantamento são apresentadas na Figura 7 e a correlação entre elas pela Equação (9). Considerando a temperatura média das máximas anual de 21,9°C e a correlação obtida com dados locais, estima-se $T_{CROP} = 24,2^{\circ}\text{C}$ e adotando-se, para fins práticos, o valor de 24°C.

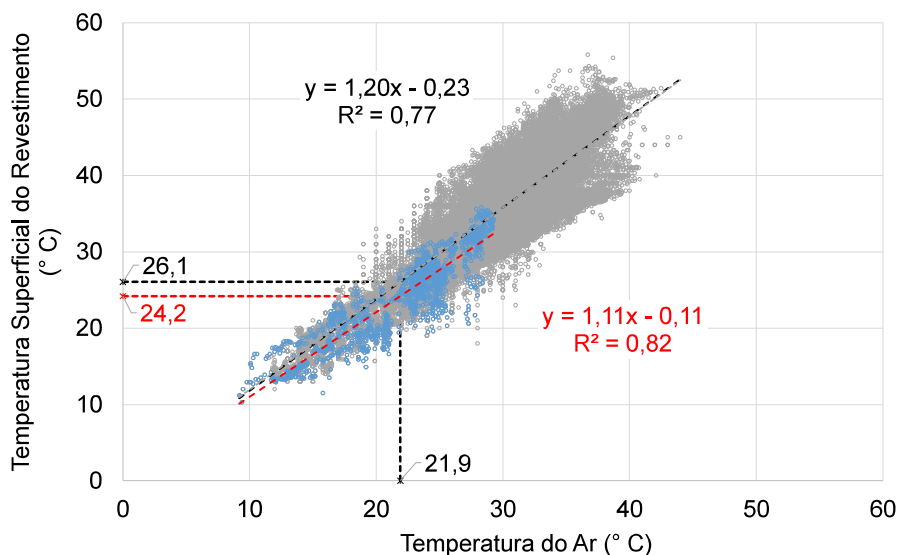


Figura 7 - Relação entre as temperaturas do ar e do revestimento asfáltico na região de Caxias do Sul/RS

$$T_{rev} = 1,11 \cdot T_{ar} - 0,11 \quad (9)$$

Onde:

- T_{rev} é a temperatura do revestimento asfáltico;
- T_{ar} é a temperatura do ar.



Neste levantamento, os resultados obtidos para a temperatura do revestimento asfáltico, considerando-se a média mais o desvio padrão para todos os pontos medidos, resultou em 26,5°C para temperatura do ar e 29,8°C para o revestimento asfáltico, valores estes não aderentes às temperaturas de operação, definidas conforme o procedimento proposto, confirmando a necessidade de avaliar os fatores de ajustamento de forma particularizada.

Para a obtenção dos fatores de ajustamento adequados à temperatura de operação da rodovia, deve-se adequar a Equação (5), utilizando o mesmo procedimento já descrito para a região de Cuiabá, tendo como base a Equação (8).

Para a temperatura crítica de operação estimada para a região de Caxias do Sul, atribui-se o fator de ajustamento igual a 1 e os fatores para as demais temperaturas variando proporcionalmente de forma que as curvas estabelecidas por Andreatini (1988) mantenham o seu formato original. O resultado obtido é apresentado pela Figura 8. Observa-se que para este caso, a correção estabelecida originalmente poderia ser aplicada, uma vez que a diferença entre a temperatura de operação e os 25°C originalmente propostos é de apenas 1°C.

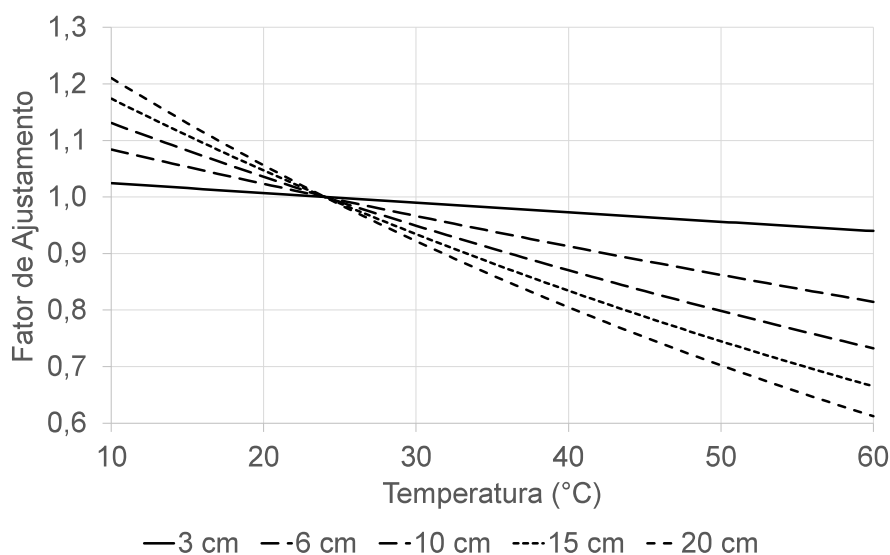


Figura 8 - Fatores de Ajustamento corrigidos para a região de Caxias do Sul/RS ($T_{CROP} = 24^{\circ}C$)

CONCLUSÕES

O presente artigo propôs particularização da metodologia de definição do fator de ajustamento das deflexões em função da temperatura, tendo os parâmetros necessários, todos medidos pelo equipamento FWD. Os resultados obtidos mostram que a metodologia adotada pela DER/SP IP-DE-P00/003 se apresentou mais adequada às regiões de clima frio, mas para as regiões de clima quente resulta em ajustes contrários à segurança, diminuindo o valor das deflexões medidas para a consideração no projeto.

Foram propostas correlações entre a temperatura do ar e a temperatura do revestimento asfáltico, ambas medidas pelo equipamento FWD em diversos trechos com diferentes características. Para demonstrar o método, foram escolhidos dois trechos de comportamentos opostos, um de clima quente



DOI: 10.29327/1430212.49-6

PARTICULARIZAÇÃO DO FATOR DE AJUSTAMENTO DAS DEFLEXÕES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS

(Cuiabá/MT), que resultou em uma temperatura crítica de operação do pavimento (T_{CROP}) de 41°C e outro de clima frio (Caxias do Sul/RS), que resultou em uma T_{CROP} de 24°C. Observou-se que os fatores de ajustamento propostos por Andreatini (1988) e adotados pela DER/SP IP-DE-P00/003 se mostram mais aderentes a locais de clima frio. Para locais de clima quente o ajuste das deflexões para a temperatura de 25°C tende a gerar uma diminuição no valor da deflexão medida em campo, se distanciando das condições de operação da rodovia e gerando uma correção que é contrária à segurança. Também, se o levantamento de campo for realizado na estação mais quente do ano a tendência é obter menores fatores de correção. Se a região tiver estação fria e o levantamento for realizado no período frio, as correções serão maiores e a favor da segurança. Assim, fica evidenciada a importância da particularização dos fatores de ajustamento, em especial para locais de clima quente. Nesse contexto, este artigo propõe uma discussão sobre qual a forma mais adequada de considerar as deflexões, em função das variações de temperatura típicas de um país de dimensões continentais, como o Brasil.

REFERÊNCIAS

- Andreatini, L. P. V. Dimensionamento de reforço em pavimentos flexíveis – Sugestões no DNER-PRO – 11/79. Anais da 23ª Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis. 1988.
- Balbo, José Tadeu (2007). Pavimentação Asfáltica – Materiais, Projeto e Restauração. São Paulo: Oficina de Textos.
- Bueno, Lucas Dotto (2016). Avaliação Deflectométrica e de Rigidez: Estudo de Caso em Três Trechos Monitorados em Santa Maria/RS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria – PPGEC/UFSM. Santa Maria/RS.
- DER/SP IP-DE-P00/003 - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo – Avaliação Funcional e Estrutural de Pavimento. Instrução de Projeto. São Paulo.
- DNER-PRO 273/96 - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Determinação de Deflexões Utilizando Deflectômetro de Impacto Tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”. Procedimento.
- DNIT/IPR-720/2006 - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes/Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. 2ª edição, Rio de Janeiro.
- Gonçalves, Fernando José Pugliero (2002). Estudo do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a Partir de Instrumentação e Ensaio Acelerados. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS. Porto Alegre/RS.
- INMET (2023). Instituto Nacional de Meteorologia/Ministério da Agricultura e Pecuária - <https://portal.inmet.gov.br/normais>.
- Moraes, Carla Gonçalves de (2015). Análise de Bacias Deflectométricas Obtidas por 4 Equipamentos do Tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Dissertação de Mestrado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.
- Motta, Laura Maria Goretti da (1979). O Estudo da Temperatura em Revestimentos Betuminosos. Dissertação de Mestrado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.
- Motta, Laura Maria Goretti da (1991). Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. Tese de Doutorado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.
- Pinto, Salomão; Preussler, Ernesto (2002). Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro: S. Pinto, 2ª edição.



RODRIGO MALYSZ, VALTER DE OLIVEIRA BOCHI, NATÁLIA GUTERRES MENSCH,
KETHELIN ELOISAKLAGENBERG BECKERT, DIÉGO DE ALMEIDAPEREIRA

Souza, Thais Patrício; Otto, Gustavo Garcia; Almeida, Adosindro Joaquim de; Souza, Rafael Aleixo de; Mori, Flavio de; Valente, Amir Mattar (2019). Efeito da Condição Climática na Temperatura de Pavimento de Concreto Asfáltico Espesso. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Balneário Camboriú/SC.

Vieira, Cristiane Schmitt (2002). Desempenho de um Pavimento Flexível Solicitado por Simulador de Tráfego. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS. Porto Alegre/RS.



INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE NO CÁLCULO DO NÚMERO DE SOLICITAÇÕES AO EIXO-PADRÃO PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO

Mônica Sayoco Nishibe Moraes¹; Yuri Paladino Silva¹; Carlos Yukio Suzuki²; Caio Rubens Gonçalves Santos³ & Flaviane Melo Lopes Vallejo³

RESUMO

Busca-se a aproximação máxima da realidade, apesar das incertezas que o processo possui, com a incorporação dos critérios de confiabilidade. Neste trabalho, apresentam-se avaliações e ponderações sobre o critério de confiabilidade que está proposto na nova instrução de projeto do DER/SP, onde se introduz um parâmetro multiplicador na equação que determina o número de solicitações ao eixo padrão. Este elemento visa reduzir possíveis diferenças entre o valor resultante da frota real às hipóteses de cálculo que são admitidas no processo de estudo de tráfego para fins de aplicação em projetos de pavimentação. O parâmetro, levado a efeito de confiabilidade variando-se de 50% a 99,9%, resulta em valores de 1 a 24,58. Estes acréscimos pela presença do valor de confiabilidade incorporado são confrontados neste trabalho aos acréscimos de valores de fatores de veículos calculados pela metodologia USACE, para algumas hipóteses de carregamentos comumente utilizadas em estudos de tráfego quando não se dispõe de dados de pesagens de veículos comerciais. Estes valores podem variar entre 60% e 100% de acréscimo nos cálculos de solicitações, ou até mais, dependendo da hipótese de carregamento adotada. Apenas este acréscimo de 60% a 100% seria equivalente à aplicação de confiabilidades entre 60% e 75%, demonstrando-se que o cálculo de solicitações é bastante sensível aos seus componentes e que a variabilidade pode trazer imprecisões que resultem em subdimensionamentos dos pavimentos para o período de projeto previsto.

PALAVRAS-CHAVE: Tráfego; Solicitações; Confiabilidade; Cargas.

ABSTRACT

The search for maximum approximation to reality, despite the uncertainties that the process possesses, is the purpose in utilizing reliability criterion. Evaluations and considerations about the reliability criterion proposed in the new DER/SP project instruction, where is introduced a multiplier parameter in the equation that determines the number of requests to the standard axis are presented in this paper. This element seeks to reduce possible differences between the resultant value of the real fleet and the hypothesis calculation that are admitted in the process of traffic studies for usage in pavement design projects. The parameter, taken to the effect of reliability, varying between 50% and 99,9%, results in values between 1 and 24,58. These increases caused by the presence of the reliability value incorporated are confronted in this paper to the increase of vehicle factor values calculated by the USACE methodology, for some of the comonly utilized load hypotheses in traffic studies when there is no data available from commercial vehicle weighings. These values could vary between 60% and 75% of increase in load calculations, or even more, depending on the adopted loading hypothesis. Just the increase of 60% to 100% would be the equivalent to reliabilities between 60% and 75%, demonstrating that the load calculation is highly sensitive to its components and that variability can lead to inaccuracies resulting in pavement underdesign for the planned design period.

KEY WORDS: Traffic, Reliability, Load.

¹ Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo – DER/SP, msnmoraes@der.sp.gov.br; ysilva@sp.gov.br

² Universidade de São Paulo, e-mail: carlos.suzuki@planservi.com.br

³ Instituto Mauá de Tecnologia, e-mail: caiorubens@maua.br; flaviane.vallejo@maua.br



INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta análises e ponderações efetuadas por efeito da inclusão do critério de confiabilidade aos cálculos dos estudos de tráfego para fins de aplicação em projetos de pavimentação. O critério, baseado em premissas de distribuição normal, está sendo incluído aos cálculos de tráfego das Instruções de Projeto do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo – DER/SP, publicados em condição de minuta e foi disponibilizado para consulta pública nos meses de dezembro de 2023 e janeiro de 2024.

Os métodos de dimensionamento de pavimentos estimam as espessuras das camadas necessárias para suportar as cargas dos veículos e as condições climáticas durante sua vida útil. Os métodos de dimensionamento de pavimentos são classificados em mecânicos, baseados na mecânica dos materiais (TIGHE et al., 2007); empírico, baseado em ensaios de laboratório ou de campo (CARVALHO e SCHWARTZ, 2006); e mecânico-empírico, onde a estrutura do pavimento é dimensionada por meio de uma análise mecânica, e seu desempenho é avaliado através de modelos de deterioração para ajustar o projeto da estrutura (CARVALHO e SCHWARTZ, 2006). Qualquer que seja o tipo de método utilizado, a confiabilidade está sempre envolvida como forma de se levar em conta a incerteza de variáveis como o crescimento do tráfego, cargas de tráfego, condições ambientais, danos progressão, propriedades mecânicas e desempenho estrutural dos materiais, bem como da qualidade dos processos construtivos (AASHTO 1993; SÁNCHEZ-SILVA et al., 2005; SANTOS, 2011).

A necessidade da consideração de um fator de confiabilidade se deve a busca de um parâmetro que possa representar mais fidedignamente ao valor real de solicitações a ser considerado no projeto. De maneira geral os estudos de tráfego para o DER/SP consideram contagens de veículos comerciais classificadas, realizadas nas rodovias que serão intervistas ou contagens que representem uma frota futura, no caso de vias a serem implantadas. Entretanto, os valores são levados a efeitos de fatores de veículos, geralmente calculados pelas considerações de hipóteses de carregamentos, uma vez que não dispõe de informações de cargas classificadas por eixos medidas em balanças (VALLEJO, 2021). Mesmo em concessionárias de rodovias, muitas vezes se lançam mão dessas hipóteses de carregamento em volumes anuais fornecidos pela contagem em praças de pedágio, onde a frota frequentemente é classificada por número de eixos, considerando configurações de veículos mais encontrados em cada região. Salienta-se que os fatores de veículos são definidos considerando-se as pressões de inflação que remontam os estudos realizados para a concepção dos modelos que são aplicados até os dias de hoje.

Segundo Moreno, Navarro & Zeballos (2017) em vários países da América Latina, como Chile (MOP, 2015) e Colômbia (INVIAS, 2012), o projeto de pavimentos é realizado utilizando adaptações do método de projeto empírico da AASHTO de 1993. Este método estima a confiabilidade do projeto estabelecendo um nível de confiança (R) que define o nível de variância adotado no projeto (Z_r) e a variância estimada a partir de cada um dos fatores utilizados na previsão do modelo (S_0). O nível de



[DOI: 10.29327/1430212.49-12](https://doi.org/10.29327/1430212.49-12)

INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE NO CÁLCULO DO NÚMERO DE SOLICITAÇÕES AO EIXO-PADRÃO PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO

confiança é estimado com base nas recomendações gerais fornecidas pelo Guia para Projeto de Estruturas de Pavimentos da AASHTO (1993) e eventualmente de acordo com a experiência e critério do projetista.

Aos volumes de veículos comerciais associados aos fatores de veículos, que são calculados pelas hipóteses de carregamento, ainda são aplicadas as taxas de crescimento anual da frota, que representam uma estimativa, já que o crescimento se vincula principalmente a geração de comércio, bem representada pelo produto interno bruto – PIB.

CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO E FATORES DO CÁLCULO DO NÚMERO N

O dimensionamento de um pavimento é feito em função do número equivalente de operações de um eixo padrão para um período de projeto pré-estabelecido. O conhecimento do tráfego para determinação do número N é de vital importância para garantir a vida útil do pavimento. No dimensionamento dos projetos de pavimentação de rodovias, segundo Huang (2004), o tráfego é o elemento de maior relevância. A consideração do tráfego deve incluir tanto a magnitude da carga, como a configuração e número de repetições de carga.

Conforme Yoder e Witczak (1975), os fatores a serem avaliados nos projetos são o efeito do tipo de veículo, o volume de tráfego e o modo de operação de cada veículo. Para o efeito do tipo do veículo deve-se levar em consideração a sua configuração, o espaçamento entre rodas e eixos, a carga, tipo de pneu e a pressão de enchimento e de contato dos pneus. Na avaliação do volume do tráfego deve-se analisar os diferentes tipos de veículos, o número de passagens de cada tipo, o efeito do desvio lateral (transversal ao pavimento) e a variação longitudinal da carga. O modo de operação do veículo refere-se à velocidade de operação do veículo. A variação da velocidade pode afetar a deflexão e o estado de tensão e deformação em função dos materiais constituintes do pavimento e ainda cada veículo pode responder de forma diferente em relação a carga dinâmica devido as oscilações oriundas das irregularidades do pavimento.

A previsão, a caracterização e o comportamento do tráfego ao longo do período de serviço são um desafio para o meio técnico, uma vez que o comportamento do usuário frente ao transporte de carga está intimamente ligado às questões políticas, econômicas e ainda existe uma grande variedade de tipos de veículos e magnitude de cargas que circulam nas rodovias.

No Brasil, a determinação do volume de tráfego é realizada com base em dados de contagens realizadas em períodos pré-estabelecidos. Essa determinação tende a não representar fielmente as condições reais da carga transportada, pois adotam-se limites de carga regulamentados e o conhecimento de dados reais de pesagem são restritos devido à ausência ou a inoperância dos postos de pesagem.

O fator de equivalência de carga (FEO) ou dano relativo original definido pela AASHTO (1993), baseado na avaliação da pista experimental, diferente do procedimento do DER/SP, leva em consideração o tipo de pavimento flexível ou rígido, a capacidade estrutural representada pelo SN no caso de pavimento flexível, os tipos de eixos, as cargas aplicadas e o nível de serventia final.



A análise da interação veículo-pneu-pavimento é complexa porque os caminhões e ônibus pesados não acarretam danos iguais a cada passagem em virtude da heterogeneidade do volume e composição do fluxo de tráfego. Ocorrem ainda incertezas no tipo de tendência e nas taxas de crescimento do tráfego, bem como nas distribuições especiais dos volumes (direcional por faixa e dispersão transversal).

A deterioração analisada também é influenciada pelas características dos materiais constituintes das diversas camadas (propriedades, estados e espessuras) e pelas ações das intempéries (gradiente térmico, insolação e precipitação pluviométrica).

Os fatores de tráfego atualmente considerados nas análises das estruturas não levam em conta as inovações tecnológicas que ocorreram em termos de pressão de enchimento dos pneus, tipos de pneus (radial/diagonal) e tipo de suspensão.

Tendo em vista as variabilidades nos dados de entrada para cálculo do número N e as incertezas do modelo empírico de equivalência adotado é fundamental que se considere a introdução de um fator de ajuste de confiabilidade no parâmetro de dimensionamento, para cobrir todos os fatores citados.

CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE INDICADO NA IP-DE-P00/001 E 002 DO DER/SP

Para o cálculo do número de solicitações ao eixo-padrão, a equação (1) apresentada incorpora um elemento de confiabilidade baseada em critérios da curva normal.

$$N = 365 \times VDM_T \times FV \times FR \times Fp \times D \times 10^{Z_c \times S_0} \quad (1)$$

Onde:

N : número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

VDM_T : volume diário médio de veículos comerciais total acumulado no período de projeto nos dois sentidos de tráfego;

FV : fator de veículo;

FR : fator climático regional;

Fp : porcentagem de veículos comerciais na faixa de projeto (%);

D : distribuição direcional (%);

Z_c : desvio normal padrão associado a um nível de confiabilidade;

S_0 : desvio padrão da previsão do tráfego

A Tabela 1 mostra os valores a serem aplicados de desvio padrão em função da classe da rodovia.



DOI: 10.29327/1430212.49-12

**INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE NO CÁLCULO DO NÚMERO DE SOLICITAÇÕES
AO EIXO-PADRÃO PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO**

Tabela 1. Nível de Confiabilidade e Desvio Padrão por Classe de Via (DER/SP/2024)

Classe da Via	Nível Recomendado de Confiabilidade (%)	Desvio padrão - S_0	
		Pav. Flexível	Pav. Rígido
Autoestrada	95 - 97,5	0,45	0,35
Rodovia: VDM > 2000	90 - 97,5	0,45	0,35
Rodovia: VDM ≤ 2000	85 - 95	0,45	0,35
Arteriais: VDM > 500	85 - 95	0,40	0,35
Outras: VDM ≤ 500	80 - 90	0,40	0,35

A Tabela 2 permite identificar o valor de Z_c a ser aplicado nos cálculos.

Tabela 2. Valores de Z_c (DER/SP/2024)

Confiabilidade	Z_c	Confiabilidade	Z_c
50%	0,000	80%	0,842
55%	0,126	85%	1,037
60%	0,266	90%	1,282
65%	0,384	95%	1,645
70%	0,524	99%	2,326
75%	0,674	99,9%	3,090

A aplicação dos valores apresentados nas tabelas 1 e 2 resultaram nos valores de $10^{Z_c S_0}$ apresentados na Tabela 3. Os cálculos foram feitos para pavimentos asfálticos.

Tabela 3. Valores de $10^{Z_c S_0}$ (pavimentos asfálticos)

Confiabilidade	Z_c	$10^{Z_c S_0}$				
		Autoestradas	Rodovias		Arteriais	Outras
		VDM > 2000	VDM > 2000	VDM ≤ 2000	VDM > 500	VDM ≤ 500
		0,45	0,45	0,45	0,40	0,40
50%	0,000	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
55%	0,126	1,14	1,14	1,14	1,12	1,12
60%	0,266	1,32	1,32	1,32	1,28	1,28
65%	0,384	1,49	1,49	1,49	1,42	1,42
70%	0,524	1,72	1,72	1,72	1,62	1,62
75%	0,674	2,01	2,01	2,01	1,86	1,86
80%	0,842	2,39	2,39	2,39	2,17	2,17
85%	1,037	2,93	2,93	2,93	2,60	2,60
90%	1,282	3,77	3,77	3,77	3,26	3,26
95%	1,645	5,50	5,50	5,50	4,55	4,55
99%	2,326	11,14	11,14	11,14	8,52	8,52
99,90%	3,090	24,58	24,58	24,58	17,22	17,22

Para as categorias de Autoestradas e Rodovias observa-se que a confiabilidade de 50% resulta na equação original de cálculo do número de solicitações do eixo-padrão. É expectável que a medida



que se busca percentuais maiores de confiabilidade os valores de 10^{ZcS0} aumentam. Assim, a adoção de confiabilidade de 60% acresce aproximadamente 30% ao valor de N, assim como para 75% seria de 100%. Aos projetos que necessitem de confiabilidade acima de 85% se poderia buscar valores mais acurados, principalmente no que se refere às pesagens dos veículos comerciais para que seja possível a adoção de confiabilidades mais baixas.

HIPÓTESES DE CARREGAMENTO

Os estudos de tráfego em que não se dispõe de dados de pesagens dos veículos comerciais apresentam hipóteses de carregamento para que seja possível a determinação dos fatores de veículos. As hipóteses são admitidas em função da análise do comportamento da frota e geralmente são composições percentuais entre veículos carregados e vazios. Apesar de guardar imprecisão por se admitir apenas valores fixos e não a variabilidade natural de cargas que são transportadas, busca-se assim uma forma de se representar o carregamento dos veículos comerciais circulantes.

Atualmente os veículos comerciais trafegam legalmente com limitação de cargas com tolerâncias de 12,5% nos eixos de veículos acima do PBT de 50tf, de acordo com a Lei 14.229 de 2021.

A disponibilidade de dados de pesagens em balanças permite conhecer todos os carregamentos de todos os veículos por determinado período de avaliação, resultando em um cálculo de fator de veículos mais próximo ao real naquela via. Sabe-se que dados de pesagem no Brasil ainda continuam escassos devido ao número reduzidos de postos de pesagem em operação.

A Figura 1 mostra que para a ocasião em que foram feitas as pesagens na balança de Queluz na Rodovia Presidente Dutra nos meses de outubro a dezembro de 2009, estes veículos apresentavam-se carregados.

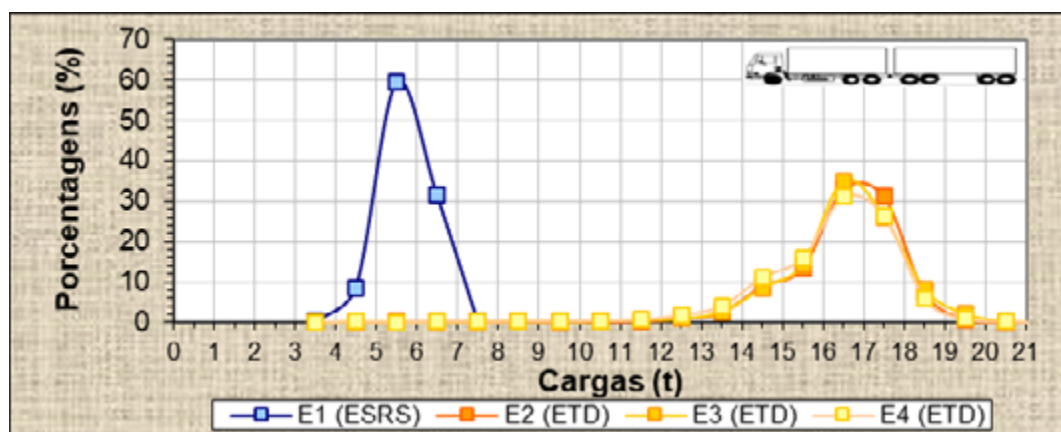


Figura 1. Percentuais de Cargas para Veículos 3D4 (MORAES/2011)

Os eixos dianteiros simples de rodas simples, ESRS, passaram pela balança com cargas de 5 a 7 toneladas para aproximadamente 90% das ocorrências. Para cada grupo dos eixos tandem duplo, ETD, foram medidas de 16 a 18 toneladas para aproximadamente 70% dos eixos. Observou-se eixos tandem com cargas acima de 20 toneladas.



DOI: 10.29327/1430212.49-12

INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE NO CÁLCULO DO NÚMERO DE SOLICITAÇÕES
AO EIXO-PADRÃO PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO

Os percentuais de cargas para os veículos 2C estão indicados na Figura 2.

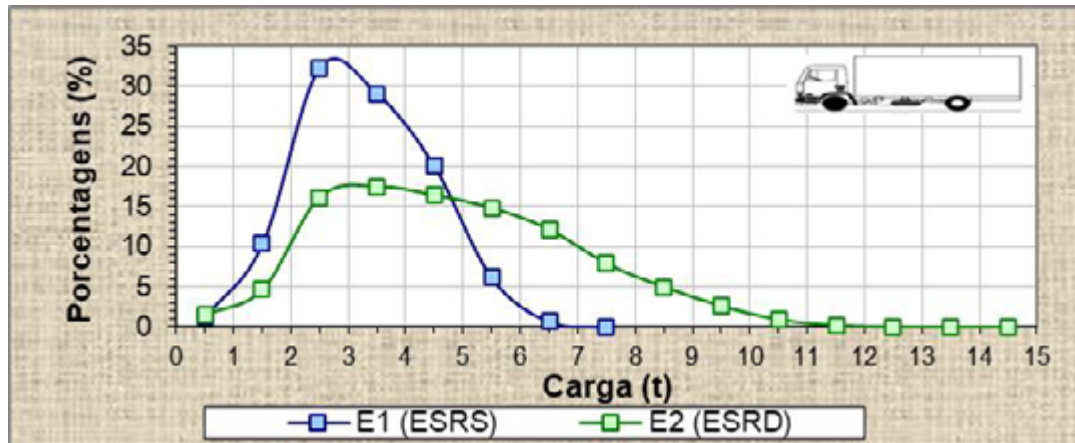


Figura 2. Percentuais de Cargas para Veículos 2C (MORAES/2011)

Para esta categoria de veículos o eixo dianteiro soma 80% de ocorrências para cargas de 2 a 5 toneladas e o eixo traseiro apresentou distribuição de 2 a 6 toneladas somando aproximadamente 60% das ocorrências. Os valores sugerem que os caminhões em sua maioria trafegaram vazios ou com pouca carga, entretanto, há registro de carregamento acima de 14 toneladas no eixo traseiro em época em que o limite máximo, incluindo a tolerância seria de 10,75 toneladas.

O estudo de Vallejo (2021) avaliou 6 anos de dados de pesagem de um posto de fiscalização da ANTT de uma rodovia federal brasileira que opera durante 24 horas do dia para elaboração de uma metodologia com abordagem probabilística para o cálculo do FV diante das mudanças da lei da balança. No estudo, foi identificado que as 8 principais classes de veículos da frota são 3C, 2S3, 2S2, 2C, 3S3, 3I3, 3D4 e 2C2 e elas representavam mais de 90% da frota.

Para os veículos tipo 3C, 2S3, 2S2, 3S3, 3I3, 3D4 e 2C2, o eixo dianteiro indicou menos de 5% na condição vazia. No segundo e terceiro eixos dos veículos tipo 2S3, 3D4, 3I3 e 3S3 menos de 10% estão na condição de vazios e nos demais eixos dos veículos 3D4 e 3I3 menos de 5%. Para o veículo 3D4 pelo menos 40% dos eixos tandem estão acima da CML depois do aumento da tolerância de 10% vigente na época, como pode ser verificado na Figura 3.

O que é evidente no estudo de Vallejo (2021) é que a sensibilidade do FV médio da frota determinado pela modelagem estatística em comparação com o método utilizado usualmente nos projetos é maior, o que poderia indicar uma maior chance de falha, em torno de 90%. A análise dos dados de pesagem evidenciou que, devido as diversas combinações de tipos e números de eixo por veículo, a hipótese simplista de considerar parte da frota totalmente vazia e o restante plenamente carregado até a CML não foi representativa da realidade da balança estudada. Em rodovias sem fiscalização de pesagem é possível que esta diferença seja maior.



MONICA SAYOCO NISHIBE MORAES,
YURI PALA-DINO SILVA, CARLOS YUKIO SUZUKI,
CAIO RUBENSGONÇALVES SANTOS, FLAVIANE MELO LOPESVALLEJO

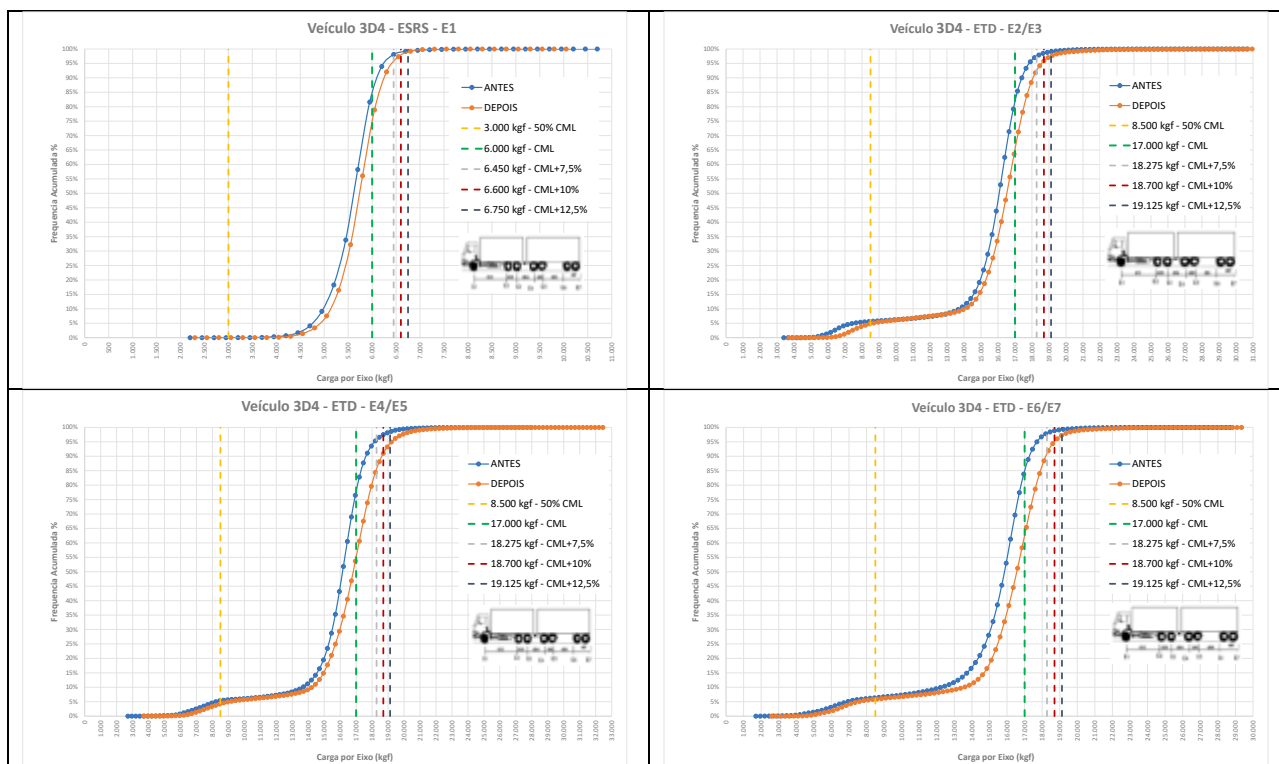


Figura 3. Frequência Acumulada para os 4 conjuntos de eixos do veículo 3D4 (VALLEJO, 2021)

Os percentuais mostram a variabilidade que se pode encontrar nos valores de cargas transportados nos diversos veículos, sendo dificilmente representados por um valor médio de referência. Mesmo assim, dada a frequente indisponibilidade de dados de pesagens dos veículos, lançam-se mão de hipóteses de carregamento, considerando cargas pré-definidas para específicas situações. A Tabela 4 mostra as hipóteses de composições de cargas mais comumente aplicadas para as determinações dos fatores de veículos nos projetos. Ressalta-se que a adoção da hipótese é efetuada pela avaliação das condições inerentes a cada projeto. Para o presente trabalho foram utilizadas todas as hipóteses apresentadas na tabela, com o propósito de observar as variações que ocorrem pela adoção de uma ou outra hipótese.

Tabela 4. Hipóteses de Carregamentos

Ordem	Descrição
1	Vazio
2	50% CML (Carga Máxima Legal) + 50% vazio
3	70% CML (Carga Máxima Legal) + 30% vazio
4	80% CML (Carga Máxima Legal) + 20% vazio
5	10% CML (Carga Máxima Legal) +Tolerância de 12,5% + 60% CML + 30% vazio
6	30% CML (Carga Máxima Legal) +Tolerância de 12,5% + 60% CML + 10% vazio
7	40% CML (Carga Máxima Legal) +Tolerância de 12,5% + 50% CML + 10% vazio
8	40% CML (Carga Máxima Legal) +Tolerância de 15% + 50% CML + 10% vazio
9	100% CML (Carga Máxima Legal)
10	100% CML (Carga Máxima Legal) +Tolerância de 12,5%
11	100% CML (Carga Máxima Legal) +Tolerância de 15%



DOI: 10.29327/1430212.49-12

INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE NO CÁLCULO DO NÚMERO DE SOLICITAÇÕES AO EIXO-PADRÃO PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO

A Tolerância de 15% não é regulamentada e está apresentada apenas para avaliar o impacto de acréscimo de mais 2,5% à tolerância em vigor. As composições (3) a (6) são as mais usualmente encontradas nos projetos, entretanto, outras variações podem ser aplicadas dependendo de cada caso.

CÁLCULO DOS FATORES DE VEÍCULOS

Os fatores de veículos são calculados através das formulações estabelecidas pelas metodologias *United States Army Corps of Engineers – USACE*, e da *American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO*. Para este trabalho, serão realizados os cálculos para a metodologia USACE. São compostos pelas determinações dos fatores de equivalência de operação, onde se aplicam as cargas para cada conjunto de eixos integrante do veículo. A Tabela 5 apresenta as equações para Determinação dos Fatores de Equivalência de Operação – FEO pela metodologia USACE.

Tabela 5. Equações para Determinação dos Fatores de Equivalência de Operação

Tipos de Eixo	Faixas de Cargas (tf)	Equações (P em tf)
Eixo simples (ESRS / ESRD)	0 – 8	$FEO = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FEO = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Eixo tandem duplo (ETD)	0 – 11	$FEO = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,4720}$
	≥ 11	$FEO = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,4840}$
Eixo tandem triplo (ETT)	0 – 18	$FEO = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FEO = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$
P = Peso bruto total sobre o eixo		

A aplicação das cargas por conjunto de eixos às equações para determinação dos FEOs resultou nos valores de Fatores de Veículos – FV apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Fatores de Veículos

Configuração	Classe	Eixos	Carga por Grupo de Eixos					Tipo de Eixo					Fatores de Equivalência de Operação					FV	
			G1	G2	G3	G4	G5	G1	G2	G3	G4	G5	G1	G2	G3	G4	G5		
Vazio	2C	2	3.000	5.000				ESRS	ESRD				0,017	0,134					0,151
CML	2C	2	6.000	10.000				ESRS	ESRD				0,278	3,289					3,567
CML + tol 12,5%	2C	2	6.750	11.250				ESRS	ESRD				0,446	6,871					7,317
CML + tol 15%	2C	3	6.900	11.500				ESRS	ESRD				0,487	7,884					8,371
Vazio	3C	2	3.000	8.000				ESRS	ETD				0,017	0,218					0,235
CML	3C	2	6.000	17.000				ESRS	ETD				0,278	8,549					8,827
CML + tol 12,5%	3C	2	6.750	19.125				ESRS	ETD				0,446	16,309					16,76
CML + tol 15%	3C	3	6.900	19.550				ESRS	ETD				0,487	18,398					18,89
Vazio	2S3	2	3.000	5.000	12.750			ESRS	ESRD	ETT			0,017	0,134	0,411				0,562
CML	2S3	2	6.000	10.000	25.500			ESRS	ESRD	ETT			0,278	3,289	9,300				12,87
CML + tol 12,5%	2S3	2	6.750	11.250	28.688			ESRS	ESRD	ETT			0,446	6,871	17,941				25,26
CML + tol 15%	2S3	2	6.900	11.500	29.325			ESRS	ESRD	ETT			0,487	7,884	20,282				28,65
Vazio	3D4	2	3.000	8.000	8.000	8.000		ESRS	ETD	ETD	ETD		0,017	0,218	0,218	0,218			0,67
CML	3D4	2	6.000	17.000	17.000	17.000		ESRS	ETD	ETD	ETD		0,278	8,549	8,549	8,549			25,92
CML + tol 12,5%	3D4	2	6.750	19.125	19.125	19.125		ESRS	ETD	ETD	ETD		0,446	16,309	16,309	16,309			49,37
CML + tol 15%	3D4	2	6.900	19.550	19.550	19.550		ESRS	ETD	ETD	ETD		0,487	18,398	18,398	18,398			55,68
Vazio	3T6	2	3.000	4.510	8.000	8.000	8.000	ESRS	ETD	ETD	ETD	ETD	0,017	0,030	0,218	0,218	0,218		0,699
CML	3T6	2	6.000	6.100	17.000	17.000	17.000	ESRS	ETD	ETD	ETD	ETD	0,278	8,549	8,549	8,549	8,549		26,01
CML + tol 12,5%	3T6	2	6.750	5.680	19.125	19.125	19.125	ESRS	ETD	ETD	ETD	ETD	0,446	0,066	16,309	16,309	16,309		49,44
CML + tol 15%	3T6	2	6.900	7.015	19.550	19.550	19.550	ESRS	ETD	ETD	ETD	ETD	0,487	0,138	18,398	18,398	18,398		55,82
Vazio	3M6	2	3.000	8.000	12.750	12.750		ESRS	ETD	ETT	ETT		0,017	0,218	0,411	0,411			1,057
CML	3M6	2	6.000	17.000	25.500	25.500		ESRS	ETD	ETT	ETT		0,278	8,549	9,300	9,300			27,43
CML + tol 12,5%	3M6	2	6.750	19.125	28.688	28.688		ESRS	ETD	ETT	ETT		0,446	16,309	17,941	17,941			52,64
CML + tol 15%	3M6	2	6.900	19.550	29.325	29.325		ESRS	ETD	ETT	ETT		0,487	18,398	20,282	20,282			59,45

Dispondo dos valores calculados e apresentados na tabela anterior é possível obter os FVs para composições de frota a serem utilizadas como hipótese de carregamento, conforme apresentados na



Tabela 4. A Tabela 7 mostra os valores determinados para cada uma das hipóteses de carregamento, para veículos que, de maneira geral, são composições que frequentemente são encontradas nas vias brasileiras.

Tabela 7 – Fatores de Veículos

Veículo	Hipótese de Carregamento	FV	Proporção ref 70/30	Veículo	Hipótese de Carregamento	FV	Proporção ref 70/30
	Vazio	0,15	0,06		Vazio	0,67	0,04
	50% CML + 50% vazio	1,86	0,73		50% CML + 50% vazio	13,30	0,72
	70% CML + 30% vazio	2,54	1,00		70% CML + 30% vazio	18,35	1,00
	80% CML + 20% vazio	2,88	1,13		80% CML + 20% vazio	20,87	1,14
	10% CMLc/tol + 60% CML + 30% vazio	2,92	1,15		10% CMLc/tol + 60% CML + 30% vazio	20,69	1,13
	30% CMLc/tol + 60% CML + 10% vazio	4,35	1,71		30% CMLc/tol + 60% CML + 10% vazio	30,43	1,66
	40% CMLc/tol + 50% CML + 10% vazio	4,73	1,86		40% CMLc/tol + 50% CML + 10% vazio	32,78	1,79
	40% CMLc/tol15 + 50% CML + 10% vazio	5,15	2,02		40% CMLc/tol15 + 50% CML + 10% vazio	35,30	1,92
	CML	3,57	1,40		CML	25,92	1,41
	CML+Tol 12,5%	7,32	2,88		CML+Tol 12,5%	49,37	2,69
CML+Tol 15%	8,37	3,29	CML+Tol 15%	55,68	3,03		
	Vazio	0,23	0,04		Vazio	0,70	0,04
	50% CML + 50% vazio	4,53	0,73		50% CML + 50% vazio	13,35	0,73
	70% CML + 30% vazio	6,25	1,00		70% CML + 30% vazio	18,42	1,00
	80% CML + 20% vazio	7,11	1,14		80% CML + 20% vazio	20,95	1,14
	10% CMLc/tol + 60% CML + 30% vazio	7,04	1,13		10% CMLc/tol + 60% CML + 30% vazio	20,76	1,13
	30% CMLc/tol + 60% CML + 10% vazio	10,35	1,66		30% CMLc/tol + 60% CML + 10% vazio	30,51	1,66
	40% CMLc/tol + 50% CML + 10% vazio	11,14	1,78		40% CMLc/tol + 50% CML + 10% vazio	32,85	1,78
	40% CMLc/tol15 + 50% CML + 10% vazio	11,99	1,92		40% CMLc/tol15 + 50% CML + 10% vazio	35,40	1,92
	CML	8,83	1,41		CML	26,01	1,41
	CML+Tol 12,5%	16,76	2,68		CML+Tol 12,5%	49,44	2,68
CML+Tol 15%	18,89	3,02	CML+Tol 15%	55,82	3,03		
	Vazio	0,56	0,06		Vazio	1,06	0,05
	50% CML + 50% vazio	6,71	0,73		50% CML + 50% vazio	14,24	0,73
	70% CML + 30% vazio	9,18	1,00		70% CML + 30% vazio	19,52	1,00
	80% CML + 20% vazio	10,41	1,13		80% CML + 20% vazio	22,15	1,14
	10% CMLc/tol + 60% CML + 30% vazio	10,41	1,14		10% CMLc/tol + 60% CML + 30% vazio	22,04	1,13
	30% CMLc/tol + 60% CML + 10% vazio	15,35	1,67		30% CMLc/tol + 60% CML + 10% vazio	32,35	1,66
	40% CMLc/tol + 50% CML + 10% vazio	16,59	1,81		40% CMLc/tol + 50% CML + 10% vazio	34,87	1,79
	40% CMLc/tol15 + 50% CML + 10% vazio	17,95	1,96		40% CMLc/tol15 + 50% CML + 10% vazio	37,60	1,93
	CML	12,87	1,40		CML	27,43	1,41
	CML+Tol 12,5%	25,26	2,75		CML+Tol 12,5%	52,64	2,70
CML+Tol 15%	28,65	3,12	CML+Tol 15%	59,45	3,05		

A coluna Proporção ref 70/30 apresenta valores de proporções do fator de veículo da hipótese em relação ao fator de veículos para a hipótese de 70% dos veículos carregados na CML e 30% de veículos vazios, que é a hipótese mais modesta daquelas que são mais aplicadas em projetos. Nota-se que a hipótese de 30% de veículos na CML acrescida de 12,5% da tolerância, 60% de veículos carregados na CML e 10% vazios, que é aplicada em projetos principalmente onde encontram-se tráfego de caminhões que servem madeireiras e usinas onde se servem de produção canavieira, o acréscimo de FV é no entorno de 66 a 71% para os veículos ora apresentados.

A hipótese de carregamento que simula a composição pesada e tolerância de 15%, criada neste trabalho apenas para avaliação de efeitos, indica acréscimos acima de 90%, ou seja, praticamente dobram os valores dos fatores de veículos.

A variação apresentada mostra que os cálculos são muito influenciados pela hipótese de carregamento adotada. A Figura 4 mostra os valores de FV calculados para cada configuração.



DOI: 10.29327/1430212.49-12

INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE NO CÁLCULO DO NÚMERO DE SOLICITAÇÕES AO EIXO-PADRÃO PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO

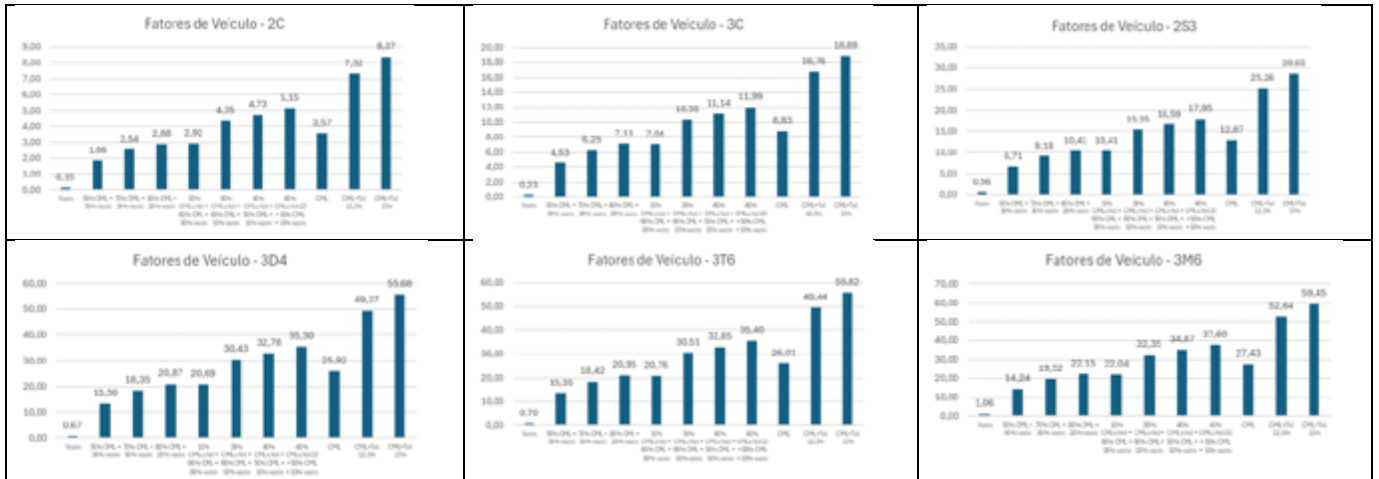


Figura 4. Variações de Fatores de Veículos

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O critério de confiabilidade que está proposto na nova instrução de projeto do DER/SP (2024) introduz o multiplicador na equação que determina o número de solicitações ao eixo padrão, $10^{Z_{\alpha} \times S_0}$. Este elemento visa reduzir possíveis diferenças entre o valor resultante da frota real às hipóteses de cálculo que são admitidas no processo de estudo de tráfego para fins de aplicação em projetos de pavimentação. O parâmetro, levado a efeito de confiabilidade variando de 50% a 99,9%, resulta em valores de 1 a 24,58.

Os cálculos realizados neste trabalho, com o intuito de comparação entre valores, mostram que para fatores de veículos calculados pela metodologia USACE e para as hipóteses de carregamentos descritos, o valor do fator de veículo a ser aplicado pode variar entre 60% e 100% de acréscimo nos cálculos de solicitações. Este acréscimo seria equivalente a aplicação de confiabilidades entre 60% e 75%. As condições de contorno deste trabalho consideram os impactos nos cálculos que ocorrem pela variação das hipóteses de carregamento que podem ser admitidas nos projetos, quando não se dispõe dos dados de pesagens dos veículos da frota circulante na via considerada para projeto. Aproximações com valores de fatores de veículos pré-definidos que são importados de outras rodovias, ainda que nas proximidades, podem carregar graus de incerteza significativos.

As equações de equivalência tanto pela AASHTO, quanto pela USACE foram definidas para as condições daquela época. Considerações quanto à pressão de inflação dos pneus devem ser ponderadas uma vez que atualmente os pneus dos veículos não são calibrados com aquelas pressões, modificando as áreas de contato das cargas. Questões referentes ao comportamento de circulação da frota também podem interferir nas considerações de danos a serem computados, como canalização de passagem dos pneus e os tempos de aplicação das cargas e tempo de repetição das solicitações, que podem solicitar o pavimento em um momento em que o pavimento ainda não se recuperou da solicitação anterior.

Desta forma, a adoção dos valores de confiabilidade deve ser tomada de maneira cautelosa pelo projetista que deve considerar todas as incertezas que cercam especificamente o projeto que está sendo elaborado, porque condições distintas podem ser encontradas em projetos diferentes até de uma mesma rodovia. Os valores de desvio padrão que são admitidos *a priori* podem ser modificados para casos específicos futuramente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Guide for design of pavement structures. Washington, D.C, 1993.



Carvalho, R. and Schwartz, C. Comparisons of flexible pavement design AASHTO empirical versus NCHRP Project 1-37A mechanistic empirical. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1947, 167 – 174, 2006.

Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo (DER/SP) IP-DE-P00/001. Projeto de Pavimentação. São Paulo, 2024.

Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre (DNIT). Manual de estudos de tráfego. Brasília, Brasil, 2006.

HUANG, Y. H. Pavements analysis and design. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004. ISBN 0-13-142473-4.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Manual de diseño de pavimentos. Colombia: Ministerio de Transporte, 2012.

Ministerio de Obras Públicas (MOP). Instrucciones y criterios de diseño. Volumen 3. Manual de Carreteras. Santiago: Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2015.

Moraes, M. S. N. Caracterização de frota de veículos comerciais circulante em rodovia de tráfego elevado como parâmetro de análise de pavimentos. 2011. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC, 2011.

Moreno, M. A. R., Navarro, T. E., Zeballos, G.T. Including reliability in the AASHTO-93 flexible pavement design method integrating pavement deterioration models. *Revista de la Construcción*, 16(2), 284-294, 2017.

Sánchez-Silva, M., Arroyo, O., Junca, M., Caro, S. and Caicedo, B. Reliability based design optimization of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 6(4), 281 – 294, 2005.

Santos, C.R.G. Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística. 2011. Tese (Doutor em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Tighe, S., Huen, K. and Haas, R. Environmental and traffic deterioration with mechanistic empirical pavement design model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1989(2), 336-343, 2007.

Vallejo, F.M.L. Impactos do excesso de carga nos pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística na determinação do fator de veículo. 2021. Tese (Doutor em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

YODER, E.; WITCZAK, M. Principles of pavement design. New York: John Willey & Sons, 1975. ISBN 0-471-97780-2.



PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DE VOLUME DE TRÁFEGO DE SEGMENTOS EXPERIMENTAIS – PRO – MeDiNa A PARTIR DE DADOS DO PNCT

Nelson Wargha Filho¹; Thiago Davi Rosa¹; Amaro Venâncio Junior¹; Mario Sergio de Souza Almeida¹; Henrique Petisco de Souza¹;

RESUMO

O programa de segmentos experimentais no DNIT, denominado PRO-MeDiNa, busca aperfeiçoar a calibração do novo método de dimensionamento nacional de pavimentos asfálticos (MeDiNa). Na fase de monitoramento desses segmentos são realizados levantamentos anuais para avaliação da condição funcional e estrutural do pavimento, além da verificação do tráfego. A operacionalização da metodologia de contagem de tráfego por 7 dias, 24 h por dia, prevista na publicação IPR- 749, se mostra inviável sem o apoio de empresa contratada. Dessa forma, o uso dos dados obtidos do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) para a determinação do tráfego nos segmentos experimentais desponta como uma alternativa viável. Na contagem convencional de 7 dias durante 24 horas, a estatística indica 90% de probabilidade de o erro não ultrapassar 25%. Já na contagem permanente, 24 h por dia, 365 dias por ano, como a do PNCT, há 90% de probabilidade de que o erro seja inferior 5%. Contudo, a classificação de veículos do PNCT, baseada apenas em número de eixos, difere da classificação utilizada nos projetos do DNIT. No presente trabalho buscou-se apresentar um procedimento que demonstre a potencialidade do uso de dados do PNCT, onde, através do registro do número de eixos e distância entre os mesmos, é possível adequá-los à classificação adotada nos estudos de tráfego formais do DNIT. Considerando-se, porém, o volume de dados gerados no PNCT, foi necessária criar uma rotina computacional para realizar esse procedimento de maneira automatizada. A ferramenta escolhida foi o Alteryx Designer que, com o auxílio de nove sub-rotinas, se mostrou promissora. Em função da riqueza de informações geradas pelo Plano Nacional de Contagem de Tráfego, propõe-se que, essa rotina elaborada para os segmentos PRO-MeDiNa, possa ser introduzida diretamente na saída dos dados do PNCT, permitindo o seu uso rotineiro nos estudos de tráfego do DNIT.

PALAVRAS-CHAVE: estudos de tráfego; numero N; calibração MeDiNa; rotina computacional.

ABSTRACT

PRO-MeDiNa, an experimental road program at DNIT, aims to improve the calibration of the new national mechanistic-empirical pavement method - MeDiNa. During the monitoring phase of these segments, annual surveys are conducted to evaluate the functional and structural condition of the pavement, in addition to traffic verification. The traffic counting methodology for 7 days/24 hours a day, as outlined in publication IPR-749, proves to be unfeasible without the use of a contracted company. Therefore, the viability of using PNCT in experimental segments was studied. The mentioned methodologies have different accuracies. For a conventional count of 7 days over 24 hours, statistics indicate a 90% probability that the error will not exceed 25%. On the other hand, considering the permanent count, 24 hours a day, 365 days a year, as in PNCT, there is a 90% probability that the error will be $\leq 5\%$. However, the vehicle classification of PNCT, based only on the number of axles, differs from the classification used in DNIT projects. In this work, we sought to present a procedure that demonstrates the potential use of PNCT data. By observing the number of axles and the distance between them, it is possible to adapt them to the classification adopted in traffic studies. However, considering the volume of data generated in PNCT, it was necessary to create a computational routine to perform this procedure in an automated manner. The chosen tool was Alteryx Designer, which, through nine sub-routines described in the text, showed promise. Due to the wealth of information generated by the National Traffic Count Plan, it is proposed that the routine developed for PRO-MeDiNa segments could be directly expanded to the PNCT data output, allowing its use in planning and traffic studies at DNIT.

KEY WORDS: traffic studies; Esal Number; MeDiNa calibration; computational routine.

¹ Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, nelson.wargha@dnit.gov.br; thiago.rosa@dnit.gov.br; amaro.venancio@dnit.gov.br; mario.almeida@dnit.gov.br; henrique.souza@dnit.gov.br



INTRODUÇÃO

Buscando o aperfeiçoamento da calibração do novo Método de Dimensionamento Nacional de pavimentos asfálticos (MeDiNa), o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) tem, desde de 2020, implantado segmentos experimentais em rodovias sob sua jurisdição, em diversas regiões do país. Esse programa, denominado PRO-MeDiNa, utilizou, inicialmente, apenas segmentos de rodovias em construção ou em restauração e se dividia em três fases: construção, monitoramento e tratamento dos dados.

A fase da construção do segmento é desmembrada em duas etapas: (i) estudos preliminares, que envolvem a coleta de dados relevantes; e (ii) execução, composta pela caracterização e avaliação dos materiais obtidos no momento de sua aplicação em campo e pelo controle de execução através de ensaios definidos. A fase de monitoramento procura avaliar as condições funcional e estrutural dos pavimentos, além dos efeitos climáticos e do tráfego no desempenho do segmento. Por fim, a última fase é o tratamento de dados coletados nas duas fases anteriores, onde são realizadas as análises dos resultados obtidos em campo juntamente com aqueles gerados pelo software MeDiNa. Em 2023, por iniciativa de técnicos da Superintendência Regional do DNIT no estado da Bahia (Almeida et al., 2022), uma variação do programa foi criada, utilizando segmentos de rodovias em operação e com boas condições funcionais e estruturais. Chamado de PRO-MeDiNa B, essa variação no programa pode ser uma interessante opção, por proporcionar mais agilidade na ampliação da coleta de dados. Isso ocorre justamente por utilizar segmentos já executados e com maior possibilidade de ocorrência do dano no pavimento, em um tempo menor, quando se compara a um segmento recém-construído.

Em ambas modalidades do PRO-MeDiNa são necessárias atividades contínuas de monitoramento com periodicidade anual, excetuando-se o levantamento de 6 meses, incluído no programa original, com rodovias em construção ou restauração. Essas atividades incluem os levantamentos e avaliações já citados.

A Diretoria de Planejamento e Pesquisa (DPP) do DNIT, através da Coordenação do Instituto de Pesquisas em Transportes (IPR), tem buscado capacitar técnicos do órgão, para que, parte desse monitoramento possa ser realizado pelos próprios servidores, com o apoio de empresas supervisoras que estiverem atuando nas proximidades dos segmentos experimentais, ou por Universidades parceiras da Autarquia. Entretanto, uma parcela importante desses levantamentos exige a contratação de empresas terceirizadas, pois envolvem, dentre outras atividades preparatórias: (i) avaliação estrutural com o *Falling Weight Deflectometer* (FWD); (ii) avaliação funcional de irregularidade longitudinal (IRI) com o perfilômetro inercial a laser e; (iii) contagem de tráfego anual.

No que se refere ao levantamento de tráfego, foco principal do presente artigo, o guia PRO-MeDiNa, publicação IPR-749 (DNIT, 2020), na sua primeira edição, indicava a contagem classificatória de 7 dias consecutivos, 24 horas por dia, em uma semana típica (não influenciada por feriado) ou uma contagem simplificada, proposta por Bueno (2019). Além disso, a publicação também recomendava a utilização de procedimentos de contagem automatizada (vídeo registro simples, identificação automática dos veículos, ou qualquer outro processo automatizado para obtenção do volume de tráfego).

Avaliou-se, contudo, que quaisquer que fossem os procedimentos utilizados, a realização desse tipo de levantamento se mostrava inviável sem a contratação de empresa terceirizada, o que poderia gerar custos significativos e atrasos no referido levantamento, devido a processos licitatórios e outros trâmites necessários para a referida contratação.



DOI: [10.29327/1430212.49-11](https://doi.org/10.29327/1430212.49-11)

PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DE VOLUME DE TRÁFEGO
DE SEGMENTOS EXPERIMENTAIS – PRO – MeDiNa A PARTIR DE DADOS DO PNCT

Considerando-se a possibilidade de utilização de dados de contagem permanente, gerados no Plano Nacional de Contagem de Tráfego - PNCT, programa gerido pela Coordenação Geral de Planejamento do DNIT – CGPLAN, buscou-se formas de empregá-lo no monitoramento dos segmentos experimentais.

Dessa forma, o presente trabalho objetiva apresentar uma proposta de utilização dos dados do PNCT em estudos de tráfego, com auxílio de algoritmos específicos, que buscam classificar os veículos de acordo com o Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (DNIT, 2006).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT)

O atual PNCT é uma evolução de um projeto criado em 1975, denominado como Programa de Contagem Sistemática de Trânsito, implantado inicialmente nas rodovias dos estados do RJ, SP e MG. Em 1977, com o nome de Plano Nacional de Contagem de Trânsito, contava com 120 postos permanentes. Em 1989, esse número passou para 235 postos, evoluindo para 266 em 1997 e 285 postos permanentes em 1998.

Em 2001 o PNCT foi interrompido por contingenciamentos orçamentários, sendo retomado somente em 2014, já denominado como Plano Nacional de Contagem de Tráfego. Ainda no mesmo ano, paralelamente à instalação dos equipamentos e a realização de pesquisas Origem/Destino (O/D), o DNIT firmou um Termo de Execução Descentralizada (TED) com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) visando o desenvolvimento de uma metodologia para consolidação e tratamento dos dados obtidos tanto na contagem como na verificação de O/D.

Em 2020, após o encerramento dos primeiros contratos, foi realizada uma nova licitação com o intuito de viabilizar a continuidade do programa. Nessa nova fase, o número de postos permanentes aumentou para 350, com mais 65 postos de cobertura/ano. Os contratos tiveram ordem de início em fevereiro de 2021 e término previsto em fevereiro de 2026. Atualmente, no ano de 2024, mais de 90% dos postos de coleta estão em operação. O principal objetivo do PNCT é estimar o tráfego dos trechos mais representativos da malha rodoviária federal, se tornando uma ferramenta de fundamental importância para o planejamento das intervenções e também para a determinação do tráfego a ser utilizado nos projetos rodoviários.

Dados de Tráfego

O Manual de Estudos de Tráfego do DNIT, publicação IPR 723 (DNIT, 2006), apresenta informações sobre o nível de confiança a ser considerado ao se optar por uma das diversas metodologias disponíveis de contagem de tráfego em uma via. Assim, para qualquer contagem é necessário decidir, preliminarmente, qual o nível de precisão requerido e então selecionar o método a ser adotado. Uma contagem de 7 dias, 24 horas por dia, por exemplo, se enquadra no Nível C, em que existe 90% de probabilidade de o erro não ultrapassar 25%. Considerando que existam contagens da rede viária do nível A/B nas proximidades do trecho em questão, com tráfego equivalente, pode-se utilizar as variações sazonais desses postos para corrigir os valores das contagens realizadas, elevando o seu nível de precisão e, dessa forma, atingir o nível B em que existe 90% de probabilidade de o erro não ultrapassar 10%.

Já em uma contagem permanente a precisão é considerada como nível A, em que existe 90% de probabilidade de o erro ser menor ou igual a 5%. Além disso, o uso do PNCT permite a obtenção de dados importantes que ajudam a entender melhor o comportamento do tráfego como o Fator K, o Fator Hora de Pico e as variações sazonais. Carvalho et al. (2015), comparou dados obtidos em



contagem realizada por 7 dias, 24 horas por dia, com dados anuais provenientes de Redutores Eletrônicos de Velocidade (REV), em 9 diferentes rodovias de Minas Gerais. Os autores observaram, neste estudo, um erro de 10% para a contagem semanal realizada.

Coleta de dados

As contagens de tráfego permanentes do PNCT são realizadas de forma automática através de equipamentos instalados em pontos considerados estratégicos das rodovias. São utilizados sensores do tipo Detector por Laço Indutivo (DLI), sendo que seu funcionamento consiste na captação das alterações na indutância de uma bobina (laço indutivo) instalada no pavimento asfáltico quando um veículo passa sobre essa bobina (Almeida et al. 2023). Destaca-se ainda a instalação adicional de sensores piezoelétricos que aferem dados secundários, como a velocidade instantânea do veículo, a estimativa do peso bruto total – PBT, e estimativa do peso por eixo. A Figura 1 apresenta a abrangência do PNCT no território brasileiro.

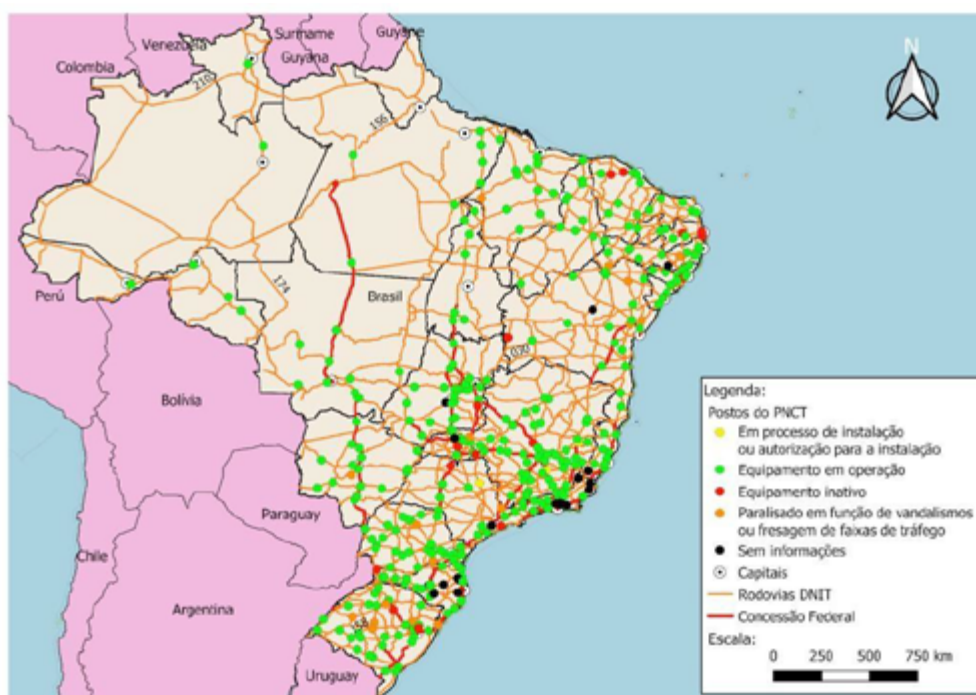


Figura 1. Mapa de postos do PNCT. (DNIT, 2024).

As informações coletadas pelos equipamentos são transferidas para o centro de processamento de dados do DNIT, com auxílio de um sistema de internet móvel. A partir daí, os dados são tratados preliminarmente onde são avaliados quanto a qualidade relacionada a ausências de eventos, vandalismo, avaria no equipamento, problemas elétricos, falha da comunicação com o equipamento, além de falha na comunicação com o sensor, para depois serem disponibilizados para acesso geral (internet).

A disponibilização dos dados ao público ocorre na página do DNIT dedicada ao PNCT, onde é possível, ainda, consultar os dados das pesquisas origem/destino (O/D), dados de tráfego dos postos permanentes, dados de tráfego dos postos de cobertura e estimativa de tráfego na malha federal a partir das informações disponibilizadas. Os dados sobre velocidade e pesagem dos veículos não têm



DOI: 10.29327/1430212.49-11

PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DE VOLUME DE TRÁFEGO
DE SEGMENTOS EXPERIMENTAIS – PRO – MeDiNa A PARTIR DE DADOS DO PNCT

precisão suficiente para serem disponibilizados para consulta pública e são coletados unicamente para uso interno do planejamento do DNIT.

Classificação PNCT

O PNCT utiliza uma classificação veicular própria com 11 classes principais, sendo as classes de “A” a “H” consideradas para classificar, pelo número de eixos, os veículos pesados, a classe “I” para veículos de passeio e utilitários, a classe “J” para moto e a classe “L” para outros veículos. As oito classes principais destinadas a veículos comerciais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Classes PNCT para veículos comerciais. (DNIT, 2024)

Classe	Veículos Comerciais								Outros veículos		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L
Nº de eixos	2	3	4	5	6	7	8	9	Passeio/ utilitário	moto	outros

Os dados disponibilizados ao público pelo site do PNCT seguem a classificação acima apresentada, gerando uma planilha com a contagem diária de cada classe de veículos, por hora e por faixa de tráfego, como exemplificado na figura 2.

Volume Horário - 15 / Maio / 2019 - BR-116/MG km 613													
Hora	Sentido	VH	Classe										
			(A) Ônibus/Cam 2 eixos	(B) Ônibus/Cam 3 eixos	(C) Caminhão 4 eixos	(D) Caminhão 5 eixos	(E) Caminhão 6 eixos	(F) Caminhão 7 eixos	(G) Caminhão 8 eixos	(H) Caminhão 9 eixos	(I) Passeio	(J) Moto	(L) Outros
0	C	13	1	6	2	2	1	0	0	0	1	0	0
	D	23	2	8	4	3	0	3	0	0	3	0	0
	Total	36	3	14	6	5	1	3	0	0	4	0	0
1	C	21	2	10	1	0	1	0	0	0	7	0	0
	D	21	7	9	0	0	2	0	0	0	2	0	1
	Total	42	9	19	1	0	3	0	0	0	9	0	1
∴	∴	∴	∴										
23	C	35	9	8	2	1	3	0	0	0	6	3	3
	D	49	5	11	5	8	6	1	0	0	11	1	1
	Total	84	14	19	7	9	9	1	0	0	17	4	4

Figura 2. Formato dos dados diários disponibilizados no site do PNCT. (DNIT, 2019).

Todavia, ao se analisar a base de dados interna, armazenada com as informações capturadas pelos contadores de veículos, verifica-se a possibilidade de uma classificação um pouco mais detalhada, já que existe a informação da distância entre os eixos do veículo. Essa análise permite que se verifique, por exemplo, se dois eixos sequenciais têm distância superior à 2,40 metros ou não. Caso seja superior pode-se defini-lo como um eixo isolado, enquanto que se a distância for inferior refere-se a um tandem duplo. No caso de três eixos sequenciais com menos de 2,40 m entre o primeiro e o segundo e entre o segundo e o terceiro, pode-se inferir então, que se trata de um tandem triplo e caso contrário tratam-se de eixos isolados. Logo, a partir dessas informações é possível a elaboração de uma nova classificação, aderente àquela adotada no PRO-MeDiNa.

METODOLOGIA

Utilização dos dados do PNCT nos segmentos PRO-MeDiNa

Considerando-se a importância dos dados de contagem permanente fornecidos pelo PNCT, que apresenta, elevado nível de confiança por identificar o número e os tipos de veículos que trafegam



nas vias em cada faixa, assim como seu volume, avaliou-se no IPR, a necessidade de se implementar segmentos experimentais, preferencialmente, em locais onde haja um posto de contagem do PNCT. Um benefício adicional para o PRO-MeDiNa é a possibilidade de verificar o crescimento do tráfego ao longo dos anos de maneira assertiva. Contudo, faz-se necessário que os dados sejam tratados para serem usados na mesma classificação empregada no Manual de Estudos de Tráfego e no Quadro de Fabricantes de Veículos (DNIT, 2006; 2021).

Os dados brutos obtidos pelo PNCT são compostos por informações individuais dos veículos, como data de aferição, velocidade, quantidade e tipos dos eixos, distância entre eixos, classe PNCT, peso por eixo e peso bruto total (PBT). A classificação do manual do DNIT categoriza os veículos segundo o número e tipos dos eixos além das distâncias entre si. Todas essas informações são enviadas em formato CSV, em que cada evento de veículo é representado por uma linha.

Na Figura 2 é apresentado, como exemplo, algumas colunas da planilha fornecida pelos postos de contagem, com as informações até o terceiro eixo dos veículos, sendo que ela pode comportar informações de veículos com até 16 eixos. Além das informações apresentadas para cada eixo, a planilha também retorna a data e horário da passagem do veículo e código SNV da rodovia. Para cada eixo, são reportadas as informações sobre o tipo de eixo, o peso aplicado e sua distância em relação ao eixo seguinte. Deve-se destacar que a identificação dos veículos por faixa de tráfego, mesmo em vias duplicadas é fundamental para distinguir o efeito do carregamento em cada uma das faixas.

faixa	tamanho total metros	classe	pbt_ton eladas	eixo_ num_ 1	tipo_ei xo_1	peso_to neladas_ eixo_1	distancia_ metros_ei xos_1_2	eixo_n um_2	tipo_eix o_2	peso_ton eladas_eix o_2	distancia_ metros_ eixos_2_ 3	eixo_ num_ 3	tipo_eix o_3	peso_ton eladas_ei xo_3	distancia_ metros_ eixos_3_ 4
1C	3,8	I1	1,522	1	S	0,903	2,3	2	S	0,619					
1C	10,5	B2	16,308	1	S	3,996	5	2	D	6,949	1,3	3	D	5,363	
1D	18	E1	59,55	1	S	5,274	3,5	2	D	10,515	1,3	3	D	15,101	5,989
1D	9	A2	19,16	1	S	9,169	5,4	2	S	9,991					

Figura 2. Exemplo da apresentação dos dados brutos fornecidos pelos postos de contagem. Fonte: (PNCT - DNIT)

A nova classificação é feita então com base nas distâncias entre os eixos fornecidas para cada veículo, que são, inicialmente, inseridas em um dos três intervalos: $d > 3,5$ m, para veículos comerciais com apenas dois eixos, e $1,2 < d \leq 2,4$ m ou $d > 2,4$ m para os demais veículos. Feita essa delimitação das distâncias entre os eixos, realiza-se em seguida a comparação dessas informações com as especificações dos veículos constituintes da classificação do DNIT. Na Figura 3 é possível ver a classificação adaptada pelo IPR e a forma como ela é introduzida no algoritmo utilizado.

N° de Eixos	Classificação Adaptada	d12	d23	d34	d45	d56	d67	d78	d89
6	3S3	>2,4	<1,2<=2,4	>2,4	<1,2<=2,4	<1,2<=2,4			
	3J3/3JD/3C3	>2,4	<1,2<=2,4	>2,4	>2,4	<1,2<=2,4			
	3I3/3N3	>2,4	<1,2<=2,4	>2,4	>2,4	>2,4			
	4R2	<1,2<=2,4	>2,4	<1,2<=2,4	>2,4	>2,4			
	2R4/2D4	>2,4	>2,4	<1,2<=2,4	>2,4	<1,2<=2,4			
	2N4	>2,4	>2,4	<1,2<=2,4	>2,4	>2,4			
	2L4	>2,4	>2,4	>2,4	<1,2<=2,4	>2,4			
	2J4	>2,4	>2,4	>2,4	>2,4	<1,2<=2,4			
	3LD	>2,4	<1,2<=2,4	>2,4	<1,2<=2,4	>2,4			

Em que: $d > 3,5 = >3,5$
 $1,2 < d \leq 2,4 = <1,2<=2,4$
 $d > 2,4 = >2,4$

Figura 3. Tabela de classificação veicular adaptada pelo IPR para veículos com 6 eixos.



DOI: 10.29327/1430212.49-11

PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DE VOLUME DE TRÁFEGO
DE SEGMENTOS EXPERIMENTAIS – PRO – MeDiNa A PARTIR DE DADOS DO PNCT

Sabe-se que é possível que diferentes configurações de veículo possam ter a mesma sequência de eixos, como por exemplo os veículos 3C3 e 3J3. Nesse caso, é importante destacar que para o fim a de cálculo do Número N, esse detalhamento não é importante.

Para exemplificar o sistema, toma-se os dados de um veículo de 6 eixos em uma das planilhas disponibilizadas pelo PNCT para a BR-420/BA. Pela classificação PNCT, esse veículo é simplesmente enquadrado na classe E, podendo ser um dos 13 veículos listados na tabela de equivalência apresentada anteriormente. Nessa situação, é necessária a identificação correta do tipo de veículo de acordo com a classificação adotada pelo DNIT. O primeiro passo é a organização das cinco distâncias entre os eixos do veículo dentro dos intervalos abordados anteriormente. A tabela 2 apresenta as informações do veículo escolhido e organização dos dados para o início do procedimento para a nova classificação proposta.

Tabela 2. Dados do veículo utilizado como exemplo.

Dados brutos	Classe PNCT	d ₁₂ (m)	d ₂₃ (m)	d ₃₄ (m)	d ₄₅ (m)	d ₅₆ (m)
	E	3,5	1,3	6,0	1,2	1,3
Organização por intervalos		>2,4	<1,2<=2,4	>2,4	<1,2<=2,4	<1,2<=2,4

A etapa seguinte é a comparação dos intervalos obtidos com o algoritmo apresentado anteriormente, segundo as informações disponíveis no Quadro de veículos do DNIT para os diferentes tipos de veículos. Nesse caso, compara-se cada uma das cinco distâncias entre eixos com aquelas descritas para os diferentes veículos de 6 eixos. A figura 4 apresenta algumas das possibilidades para a configuração de eixos considerada. Ao se comparar as distâncias entre os eixos, verifica-se que o veículo é composto por cavalo com eixo trator simples mais um eixo tandem duplo e um semirreboque com eixo tandem triplo, cujo código é 3S3. Demonstra-se assim que a nova classificação é necessária, a fim de se considerar as propriedades corretas dos veículos no cálculo do número N, sobretudo, a carga transmitida pelos eixos. Logo, esse procedimento de classificação foi adotado como embasamento para o desenvolvimento da rotina computacional descrita à seguir.



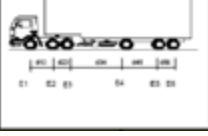
	6	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5E6 = TT, CM 25,5t d12, d34, > 2,40m 1,20m < d23, d45, d56 ≤ 2,40m	363
	6	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t E6 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d45, d56 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	313
	6	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5E6 = TD, CM 17t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23, d56 ≤ 2,40m	3J3

Figura 4. Descrição dos veículos na classificação DNIT. Fonte: (DNIT, 2006)

RESULTADOS



Rotina Computacional

Para o tratamento dos dados, visando a nova classificação dos veículos, foi empregada uma rotina computacional, utilizando a ferramenta Alteryx Designer, com intuito de automatizar o fluxo de tratamento dos dados. É possível observar que cada retângulo representa as sub-rotinas utilizadas, onde os nós representam as ferramentas aplicadas e os links a conexão entre as ferramentas no fluxo. Para garantir a rastreabilidade dos resultados, o tratamento foi dividido em nove sub-rotinas, ilustradas na Figura 5 e detalhadas em seguida (A a I).

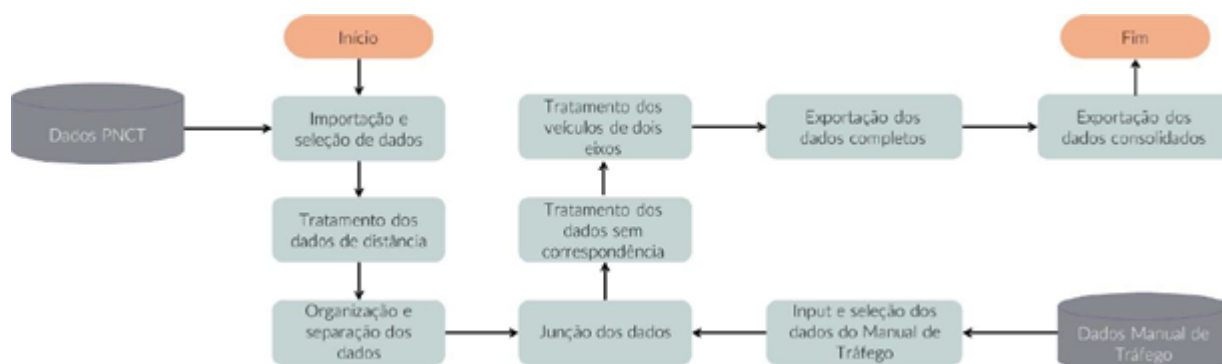


Figura 5. Fluxo de tratamento de dados no Alteryx Designer.

A - Importação e seleção de dados

Essa fase envolveu a importação dos arquivos-base em CSV (Comma-Separated-Values) de um determinado equipamento para um determinado mês de referência. Foram considerados, inicialmente, todos os 71 parâmetros disponibilizados pelo PNCT. Posteriormente, foi aplicada uma seleção aleatória para formar uma amostra com 10% do total de eventos (registro da passagem de um determinado veículo) para calibração dos parâmetros e ajustes do modelo. Em seguida essa seleção foi estendida a toda a população, para exportação final dos resultados.

B - Tratamento dos dados de distâncias

O tratamento dos dados de distâncias envolveu uma série de ferramentas com o intuito de definir a classificação da distância entre eixos para cada evento registrado. O registro do PNCT, originalmente, apresenta uma série de parâmetros que representam, em metros, a distância entre eixos utilizando a seguinte notação: $\text{distancia_metros_eixos_i_j}$, em que “i” e “j” representam os números dos eixos adjacentes. Essas distâncias (d) foram, inicialmente, classificadas de acordo com dois intervalos: $1,2 < d \leq 2,4$ e $d > 2,4$ m. Posteriormente, os veículos de apenas dois eixos foram verificados em outros dois intervalos: $d \leq 3,5$ e $d > 3,5$. Os nomes dos parâmetros também foram renomeados para dij, em que “i” e “j” representam os números dos eixos adjacentes.

C - Organização e separação dos dados

A sub-rotina de organização e separação dos dados objetivou a realização de uma série de transformações importantes para a sequência do tratamento de dados. Iniciou-se com a definição da quantidade de eixos de acordo com a quantidade de parâmetros “dij” que não apresentavam valores vazios. Posteriormente, para otimizar o processamento, removeu-se parâmetros inservíveis à sequência do fluxo e configurou-se os tipos de dados mais adequados para cada um dos parâmetros restantes. Nessa sub-rotina, uma etapa importante foi a separação de dados de automóveis (I1) e motos (J1), os quais receberam uma nova classificação denominada “passeio”, em que foram

DOI: [10.29327/1430212.49-11](https://doi.org/10.29327/1430212.49-11)

PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DE VOLUME DE TRÁFEGO
DE SEGMENTOS EXPERIMENTAIS – PRO – MeDiNa A PARTIR DE DADOS DO PNCT

detectados alguns ruídos nos dados de distâncias entre eixos nessas classes de veículos, que poderiam ensejar em uma classificação equivocada na sequência do fluxo, recebendo uma nova classificação. Essa etapa foi importante, pois foi possível detectar os demais eventos não classificados como “passeio” que seguiriam para a sub-rotina posterior.

D - Input e seleção dos dados do Manual de Tráfego

Com os dados no formato adequado, após a aplicação da sub-rotina descrita em C, foi possível preparar os dados do Quadro de Veículos do DNIT para possibilitar a classificação dos eventos do PNCT, segundo as classes definidas no referido quadro. Como subsídio para essa etapa, foi utilizada a base de dados da tabela de classificação veicular adaptada já apresentada, de forma resumida, na Figura 3. Então, foram aplicadas ferramentas de classificação e limpeza de dados para possibilitar a escolha dos tipos de informações e remoção de caracteres vazios, preparando-os para junção com os dados dos eventos.

E - Junção dos dados

A etapa de junção dos dados iniciou-se pela busca de correspondência entre os eventos obtidos no item C com a classificação adaptada obtida em D. Para isso, foram comparados os parâmetros em forma ordinal, conforme tabela A.

Tabela 3. Junção dos parâmetros dos eventos com parâmetros definidos pelo DNIT.

Parâmetro do evento (C)	Parâmetro do DNIT (D)	Descrição	Exemplo
d_{12}	d_{12}	Distância entre o eixo 1 e 2	$> 2,4$
d_{23}	d_{23}	Distância entre o eixo 2 e 3	$< 1,2 \leq 2,4$
d_{34}	d_{34}	Distância entre o eixo 3 e 4	$> 2,4$
d_{45}	d_{45}	Distância entre o eixo 4 e 5	$< 1,2 \leq 2,4$
d_{56}	d_{56}	Distância entre o eixo 5 e 6	$< 1,2 \leq 2,4$
eixo	eixos	Número total de eixos	6

Dessa forma, os dados dos eventos que apresentaram correspondência exata àqueles definidos pelo IPR, receberam a correspondente classificação. Os demais dados foram direcionados para a sub-rotina F. para tratamento complementar visando a classificação direta. Posteriormente, todas as informações já classificadas, sejam elas os eventos de veículos de passeio (abordados no item C), os veículos classificados na presente sub-rotina (item F) e aqueles que passaram por tratamento complementar (item F), foram agrupados em uma única base.

F - Tratamento dos dados sem correspondência

Conforme abordado no item anterior, os eventos que não encontraram correspondência exata com os parâmetros de classificação propostos, apesar de não terem relevante representatividade na amostra, passaram por um tratamento complementar estabelecido na presente sub-rotina. Para isso, foi feita uma comparação direta (de/para) da classificação PNCT do evento não classificado com uma correspondente classe de veículo adaptada pelo IPR mais frequente dentro daquela categoria de veículo (número de eixos).

Os dados da presente sub-rotina foram, posteriormente, agregados aos anteriores, conforme já citado no item F, para compor a base de dados final. Os dados restantes que não puderam ser classificados foram descartados. Como resultado dessa etapa, também foram exportadas bases de dados com os eventos que foram classificados utilizando a sub-rotina e os eventos descartados, para que se pudesse analisar a representatividade da quantidade de cada ocorrência.



G - Tratamento dos Veículos de Dois Eixos

De posse da base de dados finais, produto da sub-rotina F, foi verificada a necessidade de um tratamento complementar específico para os veículos de apenas 2 eixos. Assim, esses veículos cuja distância entre os eixos (d12) for \leq a 3,5 metros foi reclassificado como “passeio”. Os demais cuja d12 foi $>$ a 3,5 metros foram classificados como “2C”.

H - Exportação dos Dados Completos

Após a finalização da sub-rotina G, procedeu-se com a exportação dos dados em formato CSV sem nenhum tipo de agrupamento, apresentando 26 parâmetros, como visto na tabela 3.

I - Exportação dos dados consolidados por classe e dia

Além da exportação dos dados completos, a base de dados final, oriunda da sub-rotina H, também foi agrupada e posteriormente exportada em formato XLSX (Excel) agrupando os eventos por data (dia/mês/ano), faixa, classificação, volume médio diário (soma de eventos) e média do Peso Bruto Total. No sentido de demonstrar a potencialidade da ferramenta, utilizou-se a BR-420/BA, um dos segmentos PRO-MeDiNa em que foi realizada a nova classificação com dados oriundos do PNCT. Na tabela 4 é apresentado um fragmento da planilha final com os veículos classificados segundo a convenção definida pelo IPR para a BR-420/BA. São apresentados o volume diário médio anual (VMDa) de tráfego para cada classe de veículo, assim como a soma do peso médio. As informações são discretizadas por faixa de tráfego e podem ser organizadas na forma de dados anuais, mensais ou diários. Desse modo, a rotina computacional implementada retorna uma classificação veicular consistente, baseada em dados obtidos em uma contagem contínua, e que é totalmente empregável para o cálculo do número de repetições do eixo-padrão (N), resultando em valores mais acurados quando comparado com a contagem manual de 7 dias usualmente empregada. Logo, a implementação dessa ferramenta é essencial tanto no âmbito do PRO-MeDiNa quanto para o estudo e elaboração de projetos rodoviários.

Tabela 3. Parâmetros retornados pela rotina computacional.

Id evento	identificação da chave primária do evento, oriundo dos dados brutos do PNCT
Data hora	data e hora do evento, oriundas dos dados brutos do PNCT
Velocidade	velocidade do veículo, oriunda dos dados brutos do PNCT
faixa	em que o evento ocorreu, englobando o número da faixa e o sentido, oriundos dos dados brutos do PNCT
tamanho_total_metros	tamanho total do veículo em metros, oriundo dos dados brutos do PNCT
classe	original do veículo, oriundo dos dados brutos do PNCT
pbt_toneladas	peso bruto total em toneladas, oriundo dos dados brutos do PNCT
eixo	número de eixos, calculado pelo algoritmo apresentado
d12	distância entre o eixo 1 e 2, calculada pelo algoritmo apresentado
d23	distância entre o eixo 2 e 3, calculada pelo algoritmo apresentado
⋮	⋮
d78	distância entre o eixo 7 e 8, calculada pelo algoritmo apresentado
d89	distância entre o eixo 8 e 9, calculada pelo algoritmo apresentado
peso1	peso do eixo 1, oriundo dos dados brutos do PNCT
peso2	peso do eixo 2, oriundo dos dados brutos do PNCT
⋮	⋮
peso8	peso do eixo 8, oriundo dos dados brutos do PNCT
peso9	peso do eixo 9, oriundo dos dados brutos do PNCT
classificação	classificação final do evento, definida pelo algoritmo apresentado



DOI: 10.29327/1430212.49-11

PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DE VOLUME DE TRÁFEGO
DE SEGMENTOS EXPERIMENTAIS – PRO – MeDiNa A PARTIR DE DADOS DO PNCT

Tabela 4. Resultados obtidos da rotina computacional.

Classe	VMDa					
	1C			1D		
	2021	2022	2023	2021	2022	2023
2C	62	64	114	53	45	89
2S1	12	14	15	12	12	14
3C	13	29	10	11	9	10
3I2/3C2	1	1	1	1	1	1
3S3	1	1	2	2	1	3
4CD	2	2	3	2	2	3

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo teve a intenção de apresentar as ações que estão sendo desenvolvidas no âmbito da DPP e do IPR para realização do monitoramento do programa de segmentos experimentais no DNIT denominado PRO-MeDiNa. Uma das ações em andamento, busca aprimorar e garantir o monitoramento de tráfego desses segmentos através do Plano Nacional de Contagem de Tráfego - PNCT. Tendo em vista que há significativas diferenças entre a classificação do Manual de Estudos de Tráfego ou do Quadro de Fabricante de Veículos e aquela utilizada pelo PNCT, buscou-se compatibilizar essas diferenças classificando de forma manual o dado obtido na contagem permanente. Considerando, no entanto, que são milhares de dados gerados em cada posto de contagem, foi necessário o desenvolvimento de rotina computacional que pudesse reclassificar os dados oriundos dos postos do PNCT de forma automatizada. Para isso foi utilizada uma ferramenta conhecida como Alteryx Designer, que realizou o fluxo de tratamento de dados, através de nove sub-rotinas. Pelos resultados obtidos até o momento, avalia-se que os dados oriundos do PNCT são extremamente importantes, não só para os segmentos experimentais, mas também para o planejamento de investimentos e estudos de tráfego, incluindo taxa de crescimento em segmentos onde exista um posto de contagem. Em segmentos que não contem com um posto de contagem, mas que estejam situados em locais próximos, pode ser uma ótima opção para uma estimativa mais realista do volume de tráfego na região e de sua taxa de crescimento

Para isso, propõe-se que essa rotina possa ser incluída no PNCT, de forma que a classificação seja compatível com aquela indicada nos estudos de tráfego do DNIT.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M.S.S.; SÃO MATEUS, M.S.C.; LIMA, C.D.A.; COSTA, W.G.s.; achy, a.r.a. Proposta de metodologia para calibração do MeDiNa utilizando segmentos experimentais implementados em rodovias em operação. Anais - 24º ENACOR e 47ª RAPv, Bento Gonçalves/RS, 2022.

ALMEIDA, M.S.S.; ACHY, A.R.A.; COSTA, W.G.S.; SANTANA, V.R.; WARGHA FILHO, N.; ABRAMIDES, C.A.; CARMO, C.A.T.; MARQUES, G.L.O. Metodologia para determinação do tráfego rodoviário utilizando a técnica de processamento de Imagens. Anais - 25º ENACOR, Foz do Iguaçu, 2023.

BUENO, L. D. Contribuição para a previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos. 370 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2019.



NELSON WARGHA FILHO, THIAGO DAVI ROSA, AMARO VENANCIO JUNIOR,
MARIO SERGIO DESOUSA ALMEIDA, HENRIQUE PETISCO DE SOUZA

CARVALHO, A.P.; SANTOS, I.G.; PINTO, J.M.A.; NASCIMENTO, J.F. ANÁLISE DA MARGEM DE ERRO DO VOLUME MÉDIO DIÁRIO – VMD ESTIMADO COM BASE EM PESQUISAS DE TRÁFEGO DE CURTA DURAÇÃO. XXIX ANPET, Ouro Preto, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Publicação IPR -723 – Manual de Estudos de Tráfego, Rio de Janeiro, 2006.

_____. Publicação IPR – 749 – Guia para execução de segmentos experimentais – PRO-MeDiNa, 1ª Edição, Brasília, 2020.

_____. PNCT - PLANO NACIONAL DE CONTAGEM DE TRÁFEGO. 2024. Disponível em: <https://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Inicio/institucional>>. Acessado em: 28/04/2024.

_____. Quadro de Fabricantes de Veículos, Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/operacoes-rodoviaras/pesagem/QFV2012ABRIL.pdf>. Acessado em 26/04/2024



ANÁLISE DE RISCO EM FUNÇÃO DO CONTROLE TECNOLÓGICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL

Felipe H. Cava¹; Carlos Y. Suzuki²

RESUMO

O dimensionamento de pavimentos no Brasil é realizado por meio de métodos determinísticos, isto é, sem considerar as incertezas que existem em etapas de projeto, fiscalização, execução e operação das rodovias. Assim, os pavimentos podem acabar sendo dimensionados para níveis de confiabilidade inferiores aos que seriam adequados para certo empreendimento. Este trabalho tem objetivo analisar a confiabilidade dos pavimentos dimensionados por métodos determinísticos frente à incerteza da fiscalização e execução dos pavimentos. Além disso, considera uma análise probabilística e de risco para analisar os custos envolvidos nas faixas de confiabilidade analisadas. Observou-se que os pavimentos dimensionados por métodos determinísticos apresentam confiabilidade de 60%, quando a fiscalização é rigorosa, e 50% quando há falhas na fiscalização durante a execução. Entretanto, em ambos a confiabilidade é inferior ao que seria considerada adequada para o tipo de via analisada. As análises de risco mostram que entre as espessuras de 12 a 20 centímetros ocorre a queda do risco à medida que a espessura aumenta, comportamento este que não ocorre para espessuras menores que 12 centímetros. Além disso, o custo total da obra, levando em consideração o risco de ruptura das camadas asfálticas devido à fadiga do revestimento, apresenta um comportamento diferente para coeficientes de variação baixos e altos. Observou-se que, se a obra tiver fiscalização adequada, isto é, baixo coeficiente de variação, as espessuras de 12 e 15 centímetros apresentam custos semelhantes, embora as confiabilidades sejam distintas.

PALAVRAS-CHAVE: confiabilidade de pavimentos, variabilidade de materiais, análise probabilística.

ABSTRACT

In Brazil, pavement design is performed through deterministic methods, i.e., without considering uncertainties that exist in project, inspection, execution, and highway operation. Thus, pavements may be designed for lower reliability levels that would be suitable for the enterprise. This work aims to analyze the reliability of pavement design through deterministic methods in front of uncertainties of execution control and inspection. Furthermore, considering a probabilistic and risk analysis to determine the costs involved in the reliability ranges analyzed. It was observed that pavement designed using deterministic approach presents the reliability of 60%, with rigorous inspection, and 50% when are fails in execution control. However, the reliability of both is lower than that considered suitable for that road type. Risk analysis shows that between 12 and 20 centimeters of thickness, the risk falls as thickness increase, that behavior doesn't occur for thickness lower than 12 centimeters. Moreover, the total cost, considering the risk of premature fatigue failure in asphalt layer, it presents a different behavior for low and high coefficients of variation. It was observed that if the field work has adequate supervision, i.e., low coefficient of variation, the thickness between 12 and 15 centimeters presents similar costs, but distinct reliability.

KEY WORDS: pavement reliability, variability of materials, probabilistic analysis.

¹ Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Civil, cava@fei.edu.br

² Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Transportes, e-mail: carlos.suzuki@planservi.com.br



INTRODUÇÃO E OBJETIVO

No Brasil, o dimensionamento de pavimentos apresenta uma abordagem determinística, ou seja, o modelo tem como base os valores médios das variáveis aleatórias para estimar o desempenho da estrutura diante de um determinado critério de falha. Segundo Huang (2004), nos métodos determinísticos, cada parâmetro de análise é atribuído a um valor constante, permitindo ao projetista aplicar um fator de segurança para aumentar as cargas previstas devido às incertezas associadas ao critério em análise.

O dimensionamento de pavimentos realizado em escritórios de engenharia no Brasil considera a escolha de uma estrutura de pavimento que atenda o número de repetições do eixo rodoviário padrão calculado com critérios da USACE e AASHTO, conforme o DNIT (2006). Não são considerados fatores de segurança durante o procedimento de cálculo, e a estrutura é otimizada para minimizar a espessura do revestimento asfáltico, a qual representa o maior custo do pavimento.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise técnica e econômica do dimensionamento de pavimentos asfálticos flexíveis levando em consideração a variabilidade devido ao controle tecnológico da execução dos pavimentos. Além disso, tem como objetivo analisar o risco envolvido nas soluções de pavimentos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise da confiabilidade de estruturas, em linhas gerais, exige compreender as incertezas associadas a cada variável aleatória utilizada em um modelo de previsão de desempenho. Os métodos probabilísticos permitem examinar a sensibilidade em relação à vida útil esperada da pavimentação diante das flutuações nos parâmetros de projeto. Contudo, a precisão dessas análises está vinculada à habilidade do modelo probabilístico em representar o comportamento do pavimento frente a determinadas variáveis aleatórias (PITTMAN, 1996).

A confiabilidade em um projeto de pavimentação pode ser definida como a probabilidade de o número de repetições admissíveis ser maior do que o número de repetições solicitantes, o que para pavimentação rodoviária é dada em função do eixo rodoviário padrão (MAJI e DAS, 2008).

Entretanto, cada uma das variáveis utilizadas no dimensionamento de pavimentos apresenta uma certa variabilidade, isto é, não são valores únicos. Segundo Valle e Thom (2016), a variabilidade da espessura das camadas influencia no desempenho esperado para os pavimentos. Enquanto em nível de projeto existe apenas uma espessura especificada para uma certa camada, no campo a qualidade do controle tecnológico pode fazer com que a espessura das camadas sofra variação.

Além da espessura, a variabilidade de outras variáveis aleatórias também pode impactar no desempenho dos pavimentos. Cava (2021) estudou a variação da pressão de enchimento dos pneus em rodovias de alto volume de tráfego. O autor observou que a pressão de enchimento do eixo rodoviário padrão, usada no dimensionamento do pavimento, representa menos de 2% dos pneus dos veículos comerciais.

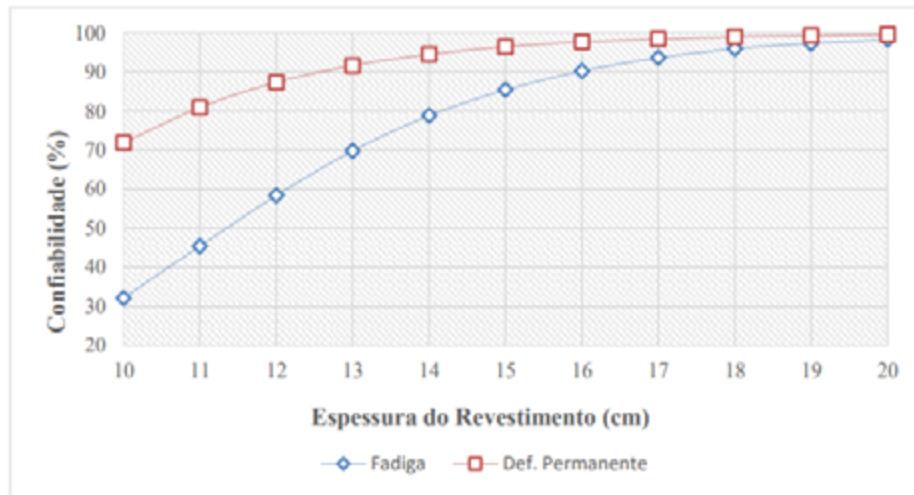


DOI: 10.29327/1430212.49-8

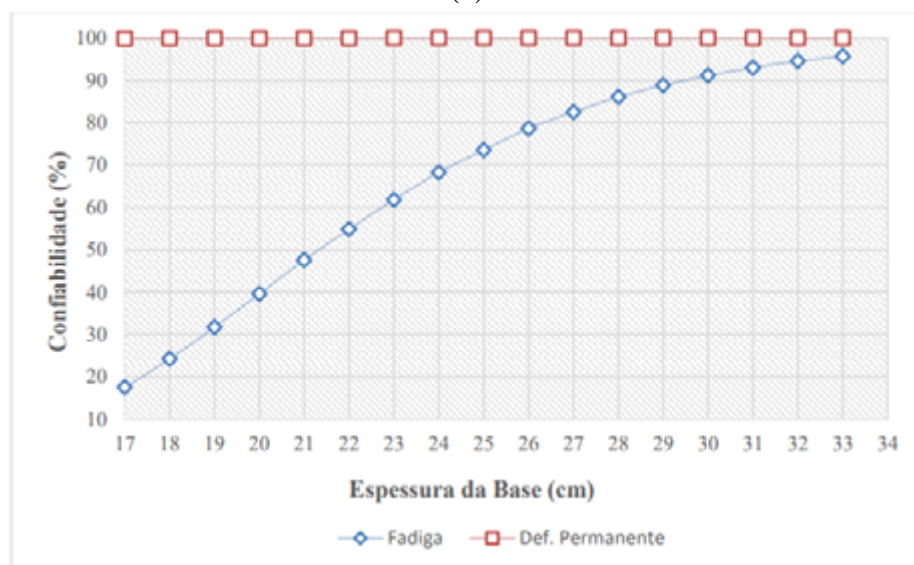
ANÁLISE DE RISCO EM FUNÇÃO DO CONTROLE TECNOLÓGICO
DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL

Cava *et al* (2023) estudou a probabilidade de falha dos pavimentos dimensionados usando a pressão de pneus do eixo padrão em relação à distribuição de pressões de pneus de campo. Os autores observaram que a probabilidade de falha é superior a 70% e recomendam que a pressão de pneus de dimensionamento seja alterada para 840kPa para conseguir representar as características de campo.

Cava e Suzuki (2024) analisaram a confiabilidade de pavimentos flexíveis e semirrígidos dimensionados no Brasil. Os autores observaram que os pavimentos semirrígidos são os mais impactados pela variabilidade dos materiais e tráfego, com confiabilidade de cerca de 30% para a espessura obtida pelo procedimento de cálculo, conforme a Figura 1. Os pavimentos flexíveis resultaram em cerca de 60% de confiabilidade para a espessura obtida pelo procedimento de dimensionamento usualmente adotado no Brasil.



(a)



(b)

Figure 1 - Confiabilidade de pavimentos dimensionados no Brasil: (a) flexíveis; (b) semirrígidos



MÉTODO

O processo empregado na concepção deste projeto foi dividido em três fases distintas. A primeira fase consistiu na realização de um estudo de tráfego no Estado de São Paulo, com o propósito de calcular o Número N e dimensionar os pavimentos de maneira determinística, seguindo a prática comum em escritórios de engenharia no Brasil. A Tabela 1 apresenta os tipos de veículos que foram levados em consideração para o cálculo do Número N. Devido à falta de informações sobre a carga transportada, assumiu-se que 20% dos veículos circulavam vazios, enquanto os 80% restantes operavam com carga máxima permitida.

Tabela 1 - Classe e Volume diário médio de veículos na rodovia

Classe	2C	3C	3CB	2S1	2S2	2S3	3S3	3I3	3D4	3T6	TOTAL
VDM	408	237	9	1	24	14	72	13	76	61	915

Após o cálculo do Número N, pelos critérios USACE e AASHTO, foi dimensionada uma estrutura de pavimento asfáltico flexível, conforme os materiais especificados na Tabela 2. Os pavimentos foram dimensionados inicialmente pelo critério CBR, conforme DNIT (2006), e realizada a verificação mecanicista para atendimento aos critérios de fadiga e deformação permanente. Foram usadas as equações de desempenho da FHWA (1976) e Dormon & Metcalf (1965), as quais constam no DER/SP (2006) e estão apresentadas nas Equações 1 e 2. Estas equações foram utilizadas para a verificação mecanicista por serem os principais modelos usados em escritórios de engenharia no Brasil. Foi considerada a solicitação proveniente do eixo rodoviário padrão com 80kN e pressão de pneus de 560kPa.

Tabela 2 - Materiais usados nas estruturas de pavimento

Camada	Material	MR (MPa)	Coef. Poisson
Revestimento	Concreto Asfáltico (CA)	3500	0,30
Base	Brita Graduada Simples (BGS)	250	0,35
Sub-base	Macadame Seco (MS)	150	0,35
Subleito	Solo LA	104	0,4

$$N_{fadiga} = 1,092 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_{ht}^{-3,512} \quad (1)$$

$$N_{def. permanente} = 6,069 \cdot 10^{-10} \cdot \epsilon_{vc}^{-4,762} \quad (2)$$

Na segunda etapa, após o dimensionamento determinístico, o pavimento flexível foi analisado levando em consideração critérios probabilísticos e a variabilidade presente nos cálculos do Número N e no controle tecnológico para construção dos pavimentos. Com objetivo de verificar a influência do controle tecnológico na confiabilidade dos pavimentos, estes foram separados em dois níveis: baixa variabilidade e alta variabilidade.



DOI: 10.29327/1430212.49-8

ANÁLISE DE RISCO EM FUNÇÃO DO CONTROLE TECNOLÓGICO
DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL

A análise probabilística foi realizada por meio da Simulação de Monte Carlo, sendo geradas 100 mil amostras de solicitação e capacidade resistente do pavimento. Por simplificação do modelo, todas as variáveis aleatórias foram consideradas com distribuição normal, de modo que a variabilidade foi considerada por meio do coeficiente de variação (CV). Nas 100 mil amostras geradas, foi calculada a função indicadora, isto é, para cada amostra, se a solicitação for maior do que a capacidade resistente do pavimento essa foi indicada como 1 e caso contrário 0, conforme as Equações 3 e 4. A confiabilidade (R) da estrutura foi calculada conforme a Equação 5. A Tabela 3 apresenta os coeficientes de variação e as variáveis aleatórias consideradas nas análises.

$$\text{Se, Resistência} > \text{Solicitação} \quad f(R > S) = 0 \quad (3)$$

$$\text{Se, Resistência} < \text{Solicitação} \quad f(R < S) = 1 \quad (4)$$

$$R = \frac{\text{amostras } f(R > S)}{\text{Total de amostras}} \quad (5)$$

Tabela 3 - Variáveis aleatórias e coeficientes de variação

Variabilidade	Item	Material	CV (%)
Baixa	h1	Revestimento	5
	MR1	Revestimento	15
	h2	Base	10
	MR2	Base	15
	h3	Sub-base	10
	MR3	Sub-base	15
	MR4	Subleito	20
	Alta	h1	Revestimento
MR1		Revestimento	30
h2		Base	20
MR2		Base	30
h3		Sub-base	20
MR3		Sub-base	30
MR4		Subleito	30
-		VDM	-
	taxa de crescimento	-	20
	FV	-	20

Na última etapa do método, foi realizada uma análise de risco da estrutura de pavimento flexível dimensionada e de custo total. O risco foi calculado conforme a Equação 6, sendo o produto da probabilidade de falha do pavimento e do custo da camada asfáltica. O risco foi calculado apenas para o material que sofreu variação de espessura na análise probabilística, sendo usada como referência a Tabela de Preços Unitários do DER/SP (2023). Já o custo total, consiste na soma do custo da camada e do custo por risco, conforme Equação 7.



$$\text{Risco} = p_f \cdot \text{custo} \quad (6)$$

$$\text{Custo total} = \text{Custo da camada} + \text{Risco} \quad (7)$$

RESULTADOS

Dimensionamento Determinístico

Com base nos dados de tráfego, o número de repetições do eixo rodoviário padrão foi determinado para um período de projeto de 10 anos, levando em consideração uma taxa de crescimento linear de 3%. Os coeficientes de equivalência de carga foram calculados de acordo com os critérios de falha da USACE e AASHTO. Os resultados obtidos neste estudo para o número N determinístico estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Número N determinístico

Critério	Número N
USACE	3,27E+7
AASHTO	9,98E+6

Para o Número N determinístico foi dimensionada a estrutura de pavimento. O pavimento foi dimensionado inicialmente pelo critério CBR e, em seguida, realizada a verificação mecanicista para atendimento aos critérios de falha. A Tabela 5 apresenta as duas estruturas dimensionadas.

Tabela 5 - Estruturas do Dimensionamento Determinístico

Camada	Material	Flexível Espessura (cm)
Revestimento	Concreto Asfáltico (CA)	12
Base	Brita Graduada Simples (BGS)	20
Sub-base	Macadame Seco (MS)	20
Subleito	Solo LA	-

Análise Probabilística

A análise probabilística foi realizada variando a espessura do revestimento asfáltico entre 5 e 20 centímetros para verificar a confiabilidade associada. Além disso, conforme destacado no Item 3, foram analisadas duas condições de variabilidade com objetivo de simular o controle tecnológico e de execução das camadas do pavimento.

A variabilidade baixa está associada a um bom comportamento tecnológico, isto é, a fiscalização e a qualidade do processo de execução são rigorosas. Assim, o coeficiente de variação tende a ser



DOI: 10.29327/1430212.49-8

ANÁLISE DE RISCO EM FUNÇÃO DO CONTROLE TECNOLÓGICO
DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL

menor. Por outro lado, a alta variabilidade ocorre quando a fiscalização não é severa e o procedimento de execução falha muito no atendimento ao projeto. A Figura 2 ilustra a variação da confiabilidade para o critério de fadiga do revestimento asfáltico em função da variabilidade.

Observa-se que para espessuras esbeltas de revestimento asfáltico, isto é, inferiores a 10 centímetros, a variabilidade é pouco influente na confiabilidade da estrutura para o caso estudado neste trabalho. Entretanto, entre 10 e 20 centímetros, a variabilidade devido ao controle tecnológico afeta diretamente a confiabilidade da estrutura.

Para o pavimento dimensionado de modo determinístico, observa-se que uma diferença de cerca de 10% na confiabilidade para alta e baixa variabilidade. Assim, quando o pavimento é dimensionado de modo determinístico e executado por uma empresa com fiscalização eficiente, a confiabilidade da estrutura é de cerca de 60%. Entretanto, se a empresa responsável pela execução não for fiscalizada adequadamente, a confiabilidade do pavimento é de 50%. Assim, o atendimento da estrutura ao tráfego não depende apenas do dimensionado executado. A fiscalização durante a execução do pavimento, *i.e.*, atendimento a questões de compactação, características dos materiais, módulos de resiliência e afins, é fundamental para melhorar o desempenho dos pavimentos.

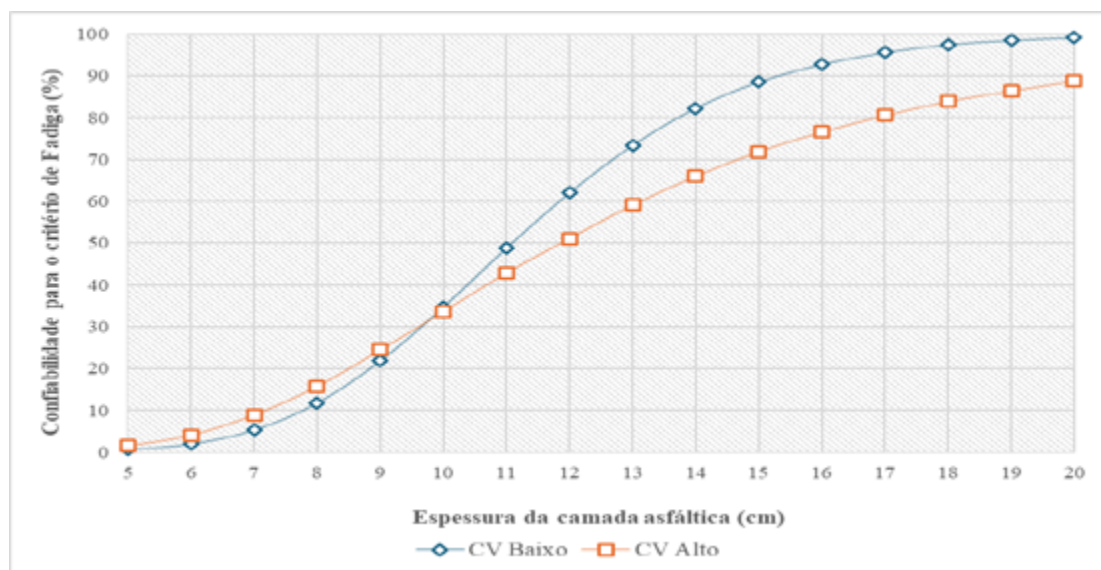


Figura 2 - Confiabilidade para critério de fadiga em função da variabilidade

Ainda assim, segundo recomendações de confiabilidade da AASHTO (1993; 2008) e MeDiNa (Franco e Motta, 2020) para um sistema arterial, a estrutura dimensionada pelo método determinístico não atende aos níveis exigidos e que variam de 70% a 95%. Assim, para o pleno atendimento à confiabilidade do sistema arterial, o pavimento deveria apresentar espessura entre 13 e 17 centímetros, para baixa variabilidade, e 15 a 20 centímetros para alta variabilidade.

A Figura 3 ilustra a confiabilidade para o critério de falha por deformação permanente. Observa-se que para este critério de falha o dimensionamento determinístico já atende aos níveis exigidos de



confiabilidade para o sistema arterial. Entretanto, nota-se que a alta variabilidade reduz significativamente a confiabilidade para deformação permanente.

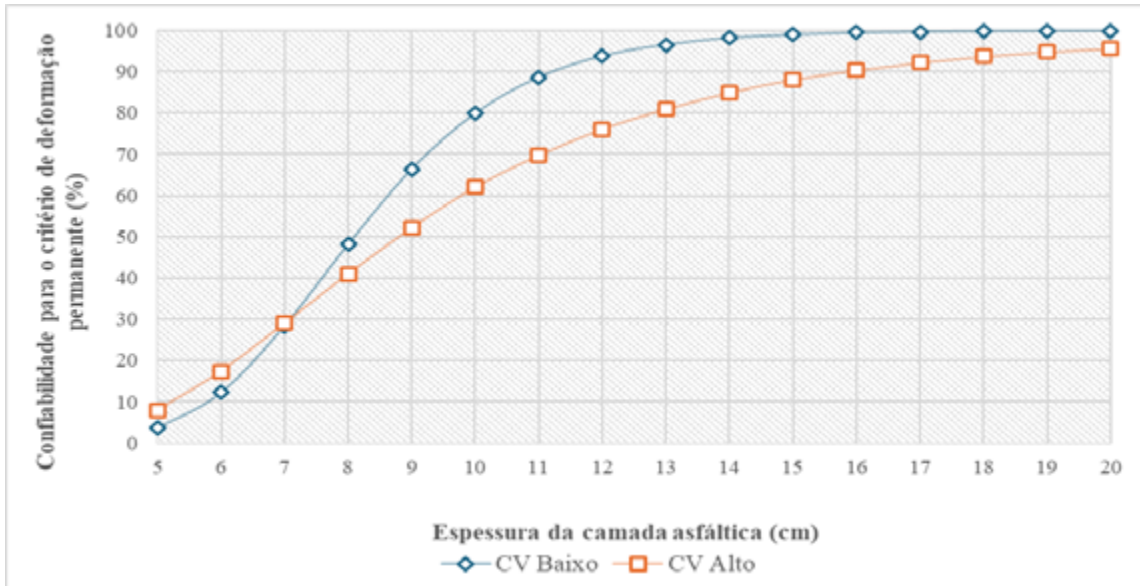


Figura 3 - Confiabilidade para o critério de deformação permanente em função da variabilidade

Análise de Risco e de Custo

Para o pleno atendimento da confiabilidade do sistema arterial, a espessura de revestimento asfáltico deveria ser aumentada. A necessidade de aumento da espessura do revestimento asfáltico resultaria também em uma mudança dos custos de execução em obras de pavimentação. A Figura 4 apresenta a variação do custo da camada asfáltica por metro quadrado.

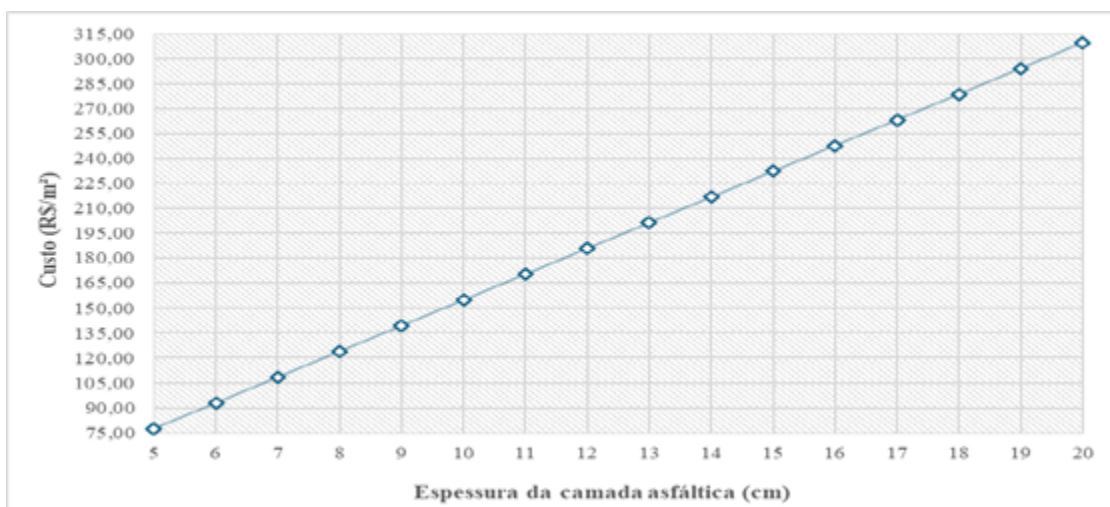


Figura 4 - Variação do custo da camada asfáltica

DOI: [10.29327/1430212.49-8](https://doi.org/10.29327/1430212.49-8)ANÁLISE DE RISCO EM FUNÇÃO DO CONTROLE TECNOLÓGICO
DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL

Observa-se que a espessura de 13 centímetros, que atende a 70% de confiabilidade para baixa variabilidade, representa um aumento de custo de material de 8% em relação aos 12 centímetros dimensionados pelo método determinístico. Para 15 centímetros de espessura, de mesmo modo, essa variação relativa é de 25%.

A Figura 5 ilustra a variação do risco em função da variabilidade. Como o risco é o produto da probabilidade e do custo, não necessariamente a redução apenas da probabilidade de falha resulta na redução do risco, como pode ser notado pelas espessuras entre 5 e 10 centímetros. Observa-se que a alta variabilidade resulta também nos maiores riscos para espessuras variando de 10 a 20 centímetros. Nesse intervalo, o aumento da espessura reflete na redução do risco.

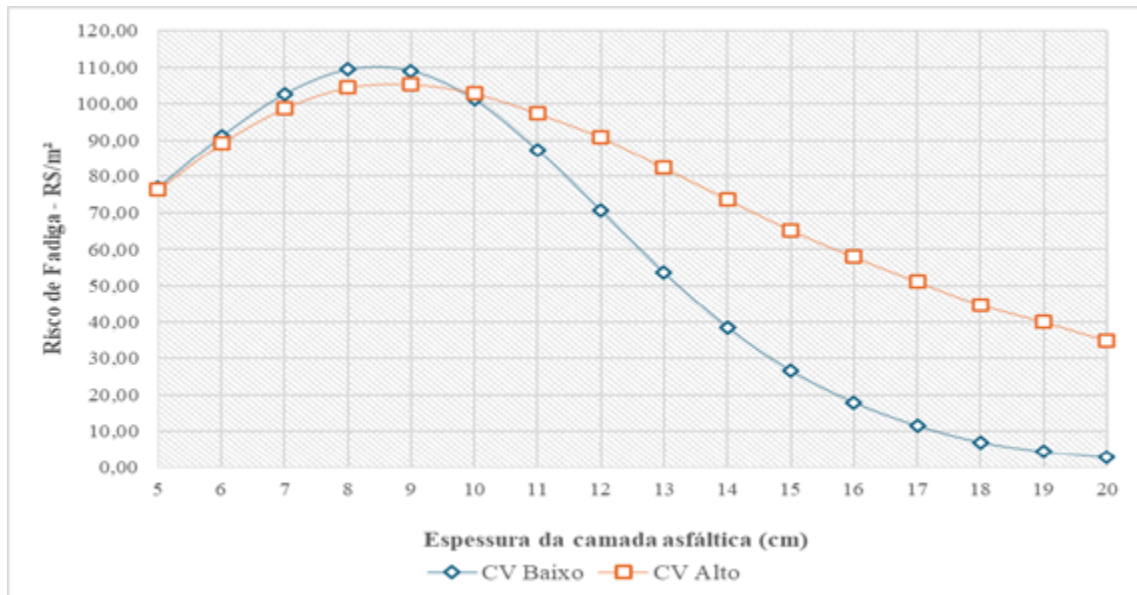


Figura 5 - Risco de fadiga para alta e baixa variabilidade

Uma análise técnica e econômica deve avaliar o custo total da obra, o que envolve tanto o custo da construção quanto o custo do risco. Assim, escolher pela solução de menor custo de construção não necessariamente consiste na melhor alternativa. A Figura 6 apresenta a análise do custo total para espessuras variando de 12 a 20 centímetros.

Observa-se que para baixa variabilidade, entre as espessuras de 12 e 15 centímetros, ocorre a redução do custo da obra. Isto é, a diferença no custo de construção do pavimento com 12 e 15 centímetros é praticamente desprezível se levado em consideração o risco. Contudo, a probabilidade de o pavimento falhar precocemente passa de cerca de 40% (12 centímetros) para 10% (15 centímetros). Assim, a mudança na espessura resulta em maior confiabilidade no atendimento ao tráfego solicitante, mesmo não representando grande variação no custo da obra.

Contudo, para alta variabilidade, o custo total da obra é crescente em todo o intervalo analisado. Neste caso, a variação de espessura de 12 para 15 centímetros de revestimento asfáltico implica em um aumento do custo total de cerca de 8%.

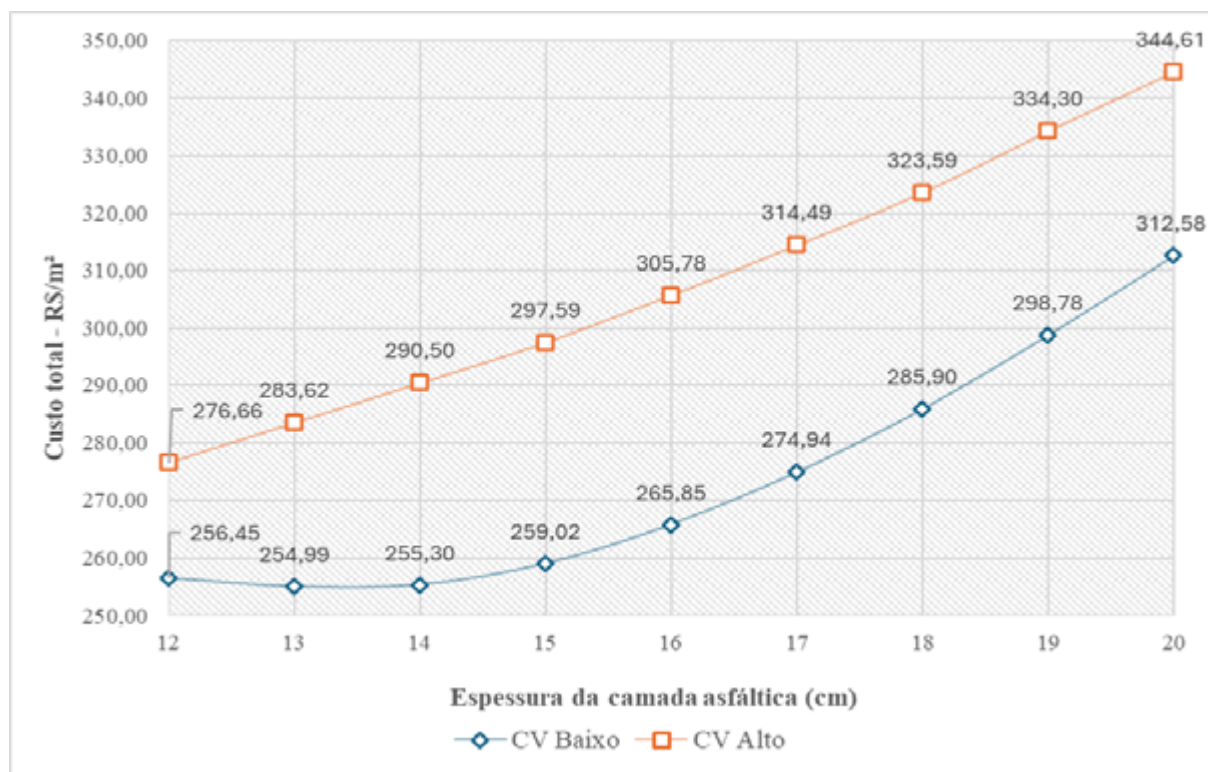


Figura 6 - Custo total da obra para alta e baixa variabilidade

CONCLUSÃO

Os pavimentos no Brasil são dimensionados de modo determinístico, isto é, não levam em consideração a variabilidade dos materiais, da fiscalização durante a execução dos pavimentos e de outras variáveis. Este trabalho teve como objetivo analisar a confiabilidade e o risco dos pavimentos asfálticos rodoviários quanto ao controle tecnológico durante a execução dos pavimentos.

Observou-se que o pavimento dimensionado pelo método determinístico resulta em uma confiabilidade entre 60% e 50% e risco entre R\$ 70,00 por metro quadrado e R\$ 90,00 por metro quadrado, para baixa e alta variabilidade, respectivamente. Ou seja, a variabilidade resultante da eficiência da fiscalização durante a execução dos pavimentos possui também um impacto técnico e econômico no desempenho dos pavimentos durante sua vida útil.

Com relação ao custo total da obra, conclui-se que a análise de custo total, incluindo o custo da obra e o custo proveniente do risco envolvido na solução adotada, constitui uma forma mais coerente de tomada de decisão. Observou-se que soluções com confiabilidades distintas podem apresentar o mesmo custo total desde que estes aspectos sejam levados em consideração.



DOI: [10.29327/1430212.49-8](https://doi.org/10.29327/1430212.49-8)

ANÁLISE DE RISCO EM FUNÇÃO DO CONTROLE TECNOLÓGICO
DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. *Mechanistic-empirical pavement design guide: a manual of practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2008.

AASHTO. *Guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 1993.

Cava, F.H; Suzuki, C.Y. Análise técnica e econômica da confiabilidade de pavimentos flexíveis e semirrígidos no Brasil. XXII Congresso Ibero-latinoamericano del Asfalto (XXII CILA). Granada, 2024.

Cava, F.H; Suzuki, C.Y; Santos, C.R.G; Vallejo, F.M.L; Azevedo, A.M. Considerações sobre a variação da pressão de enchimento dos pneus na confiabilidade dos projetos de pavimentos asfálticos rodoviários. 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária e 48º Reunião Anual de Pavimentação. Foz do Iguaçu, 2023.

Cava, F.H. Análise da influência da pressão de enchimento dos pneus e da condição de aderência entre camadas no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Dissertação de Mestrado: Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2021.

Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP). IP-DE-P00/001 Projeto de Pavimentação. São Paulo, Janeiro, 2006.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Manual de Pavimentação. Publicação IPR 719. 3º Edição. Rio De Janeiro, 2006.

Franco, F.A.C.P; Motta, L.M.G. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos – manual de utilização do programa Medina. Departamento nacional de infraestrutura de transportes, Agosto 2020.

Huang, Y.H. *Pavement Analysis and Design*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2004.

Pittman, D.W. *Development of a Reliability-based design procedure for rigid and flexible airfield pavements*. US Army Corps of Engineers. Vicksburg, 1996.

Valle, P.D; Thom, N. Reliability in pavement design. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Prague, 2016.



EFEITO DO EXCESSO DE CARGA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: ESTUDO DE CASO EM MINAS GERAIS

Ana Carolina Felício Bicalho¹; Thais Berger Barbosa da Silva²; Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli² & José Maria dos Santos²

RESUMO

A presença de veículos comerciais trafegando com excesso de carga é comumente observada em rodovias brasileiras. Contudo, tais excessos de carga não são considerados nos métodos de dimensionamento de pavimentos e podem reduzir o ciclo de vida da estrutura. A deterioração mais rápida do pavimento ocasiona a redução da vida útil e aumenta o número e frequência de manutenções, causando prejuízos aos veículos e usuários, elevando o risco de acidentes e danos ambientais. Dessa forma, o presente estudo relaciona o excesso de carga e o dimensionamento de pavimentos, com o objetivo de identificar os impactos ao longo do ciclo de vida de uma estrutura genérica. Para tanto, foram determinados os fatores de equivalência de carga (FEC) obtidos pela resposta da estrutura ao incremento de cargas por eixo através de um programa computacional de análise elástico linear, levando em conta a amplitude de sobrecargas observadas na rodovia MGC-354, no estado de Minas Gerais. Os principais resultados mostraram a redução no ciclo de vida do pavimento ao se avaliar o excesso médio em relação à carga máxima permitida pela legislação. Contudo, vale ressaltar que os resultados foram obtidos para um local onde já existe fiscalização e, dessa forma, outros trechos rodoviários podem apresentar excessos de carga que impactem ainda mais no dimensionamento do pavimento.

PALAVRAS-CHAVE: dimensionamento de pavimento; excesso de carga; pesagem de veículos; ELSYM5; fator de equivalência de carga.

ABSTRACT

The presence of commercial vehicles traveling with overloaded cargo is commonly observed on Brazilian highways. However, such cargo overloads are not considered in pavement design methods and can reduce the pavement's life cycle. The faster deterioration of the pavement leads to a reduced useful life and increases the number and frequency of maintenance activities, potentially causing damage to user vehicles, elevating the risk of accidents, and environmental damages. Therefore, this study relates cargo overload to pavement design, aiming to identify the impacts throughout the life cycle of a generic structure. For this purpose, the Load Equivalency Factors (LEF) were determined based on the structure's response to load increments per axle using a linear elastic computational analysis program, considering the amplitude of overloads observed on the MGC-354 highway, in the state of Minas Gerais. The main results showed a reduction in the pavement's life cycle when considering the typical excess compared to the maximum load permitted by legislation. However, it is worth mentioning that the results were obtained for a location where supervision already exists; therefore, other road sections may present excess loads that have an even greater impact on the pavement design.

KEY WORDS: pavement design; excess load; vehicle weighing; ELSYM; load equivalency factor.

¹ Agência de Transporte do Estado de São Paulo – ARTESP; e-mail: anacarolinabicalho@gmail.com.

² Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais- DER-MG; e-mail: thais.berger@der.mg.gov.br; bruna.beleigoli@der.mg.gov.br & jose.santos@der.mg.gov.br.



DOI: [10.29327/1430212.49-10](https://doi.org/10.29327/1430212.49-10)

EFEITO DO EXCESSO DE CARGA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS:
ESTUDO DE CASO EM MINAS GERAIS

INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo Medina e Motta (2015), os métodos predominantes para o dimensionamento de pavimentos baseiam-se no número "N" de repetições de um eixo simples com rodas duplas, com 8,2 t e 80 psi (552 kPa) de pressão de enchimento nos pneus. Segundo Franco (2007), a tendência mundial é dimensionar o pavimento asfáltico considerando o tráfego explicitamente pela ação de diferentes cargas de eixo. Hussain e Parker (2006) e Fernandes Junior (1994) reforçam que o desempenho do pavimento está associado à carga por eixo e ao peso bruto total, verificando inclusive que veículos com dois eixos danificam mais do que veículos com três a cinco eixos, quando carregados no limite permitido. Atualmente, a legislação brasileira impõe limites de carga por eixo. No entanto, de acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019), alguns caminhoneiros e transportadoras, com o objetivo de realizar menos viagens e otimizar o lucro, transportam cargas maiores do que o permitido pela Lei da Balança. Como consequência, além de danificar os veículos, essa decisão aumenta o consumo de combustível e o risco de acidentes, interfere na qualidade das rodovias, gera problemas ambientais e ainda prejudica o mercado transportador. Apesar disso, no Brasil, embora sejam fixados os limites legais para as cargas transportadas nos veículos rodoviários, ainda são permitidas tolerâncias percentuais sobre a Carga Máxima Legal (CML) e sobre os limites legais de carga por eixo (INOUE, 2023). Os limites previstos pela legislação brasileira consideram as tolerâncias de 5% do Peso Bruto Total (PBT) e de 12,5% do peso por eixo (BRASIL, 2021). Diante das limitações para uma fiscalização efetiva e das penalidades amenas quando aplicadas, este estudo tem como objetivo avaliar o impacto do excesso de carga e sua influência na redução da vida útil de pavimentos flexíveis. Para isso, foram analisados dados de tráfego coletados em um posto de pesagem de uma rodovia localizada no estado de Minas Gerais, obtidos com o apoio da Gerência de Ativos Rodoviários (GAR) da Diretoria de Planejamento, Engenharia e Inovação (DPEI) do DER-MG e em seguida, foram avaliados os impactos dos excessos de carga identificados através dos fatores de equivalência de carga.

LEI DA BALANÇA

Um breve histórico da legislação brasileira referente às limitações das cargas rodoviárias é encontrado no estudo de Bernucci e Vallejo (2019). Os autores afirmam que a Resolução nº 489 do CONTRAN, de 05/06/2014, modificou os artigos 5º e 9º da Resolução nº 258, de 30/11/2007, também do CONTRAN, na qual é estabelecida uma metodologia de aferição de peso de veículos, fixando percentuais de tolerância e outras providências. O artigo 5º passou a permitir a tolerância de 5% ao PBT e de 10% sobre os limites de pesos regulamentares por eixo, anteriormente fixada em 7,5%. Contudo, a legislação sofreu uma atualização adicional em 21 de outubro de 2021, quando a Medida Provisória nº 1050 modificou a Lei nº 7.408 (25 de novembro de 1958) e a Lei nº 9.503 (23 de setembro de 1997) do CONTRAN, resultando na Lei nº 14.229. Através do Artigo 1º, esta lei ampliou mais uma vez o Inciso II do Artigo 5º da Resolução 526, aumentando a tolerância para 12,5% sobre os limites de peso bruto transmitido por eixo de veículos às superfícies das vias públicas. No dimensionamento do pavimento, é importante atentar para as tolerâncias percentuais estabelecidas na legislação sobre o Peso Bruto Total (PBT), o Peso Bruto Total Combinado (PBTC) e a Carga por Eixo, e não apenas ao limite da Carga Máxima Legal (CML). A não consideração das tolerâncias é um indício de que o pavimento está subdimensionado, porém sabe-se que não é uma tarefa fácil



prever a ocupação do carregamento dos caminhões, uma vez que isso também pode variar com a época do ano e outros fatores.

FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA

De acordo com Fernandes Junior (1994), compreender os impactos do tráfego sobre a durabilidade dos pavimentos é uma tarefa complexa, dada a considerável variação no volume de tráfego e nas cargas veiculares ao longo do tempo e do espaço durante a vida útil de um pavimento. Além disso, a capacidade estrutural dos pavimentos é influenciada pelo envelhecimento dos materiais, sendo também afetada pelas condições ambientais, como temperatura, que afeta o módulo de rigidez do revestimento asfáltico, e o teor de umidade do subleito. É essencial compreender os efeitos cumulativos das solicitações de tráfego para o desenvolvimento de métodos de dimensionamento e sistemas de gerenciamento de pavimentos.

Devido à vasta gama de condições de tráfego, os danos ao pavimento causados por qualquer eixo são expressos através dos Fatores de Equivalência de Cargas (FEC). Fernandes Junior (1994) destaca que os FEC permitem a conversão de diferentes tipos de solicitações de tráfego em um valor equivalente de uma solicitação-padrão, facilitando o dimensionamento e a previsão do desempenho dos pavimentos para tráfego variado. Além disso, o conceito de equivalência de cargas é crucial para a distribuição de responsabilidades em relação aos custos de manutenção e restauração de rodovias, permitindo a comparação dos danos causados por diferentes tipos de solicitações.

É importante ressaltar que a deterioração dos pavimentos está diretamente relacionada à carga por eixo, não ao peso bruto total combinado (PBTC). Esta relação foi estabelecida com base nos estudos realizados pela AASHO Road Test nos Estados Unidos, no final da década de 1950 (HRB, 1962). Nesses estudos, definiu-se um eixo padrão como sendo um eixo simples de rodas duplas com carga de 18,000 lbs (8,2 tf) e 80 psi (552 kPa) de pressão de enchimento dos pneus. Conforme mencionado por Fernandes Junior (1994), os engenheiros da pesquisa denominada AASHO Road Test observaram uma relação exponencial entre as cargas por eixo e a deterioração dos pavimentos, sendo que o expoente dessa relação geralmente se aproxima de 4. Esta relação é comumente tratada através da "*lei de quarta potência*" (FERNANDES Jr., 1994).

A Lei da Quarta Potência, apesar de ser uma simplificação, oferece uma vantagem significativa ao considerar a estrutura específica do pavimento avaliado. Isso significa que diferentes tipos de pavimento podem reagir de maneiras distintas sob as mesmas cargas, o que não é contemplado no método puramente empírico. Enquanto este último presume que o dano é uniforme, independentemente da estrutura do pavimento, a Lei da Quarta Potência reconhece a diversidade das estruturas de pavimento e sua influência sob cargas equivalentes.

Fator de Equivalência de Carga Empírico

No Brasil, os Fatores de Equivalência de Cargas empregados nos métodos de dimensionamento de pavimentos novos e no reforço de pavimentos existentes são predominantemente empíricos. Segundo Fernandes Junior (1994), os FEC do Método da AASHTO, modificados por Treybig e Von Quintus (1976), são utilizados pelo Método de Projeto de Restauração DNER-PRO 159-85 (DNIT, 2006a). Já os FEC do Método do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) (TURNBULL; FOSTER; AHLVIN, 1962) estão presentes no Método de Projeto de Pavimentos



DOI: 10.29327/1430212.49-10

EFEITO DO EXCESSO DE CARGA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS:
ESTUDO DE CASO EM MINAS GERAIS

Flexíveis do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), de autoria do Engenheiro Murillo Lopes de Souza (SOUZA, 1981).

Embora os FEC da AASHTO sejam os únicos baseados em observações de campo sistematizadas, sua aplicabilidade é limitada por diversas razões mencionadas por Fernandes Junior (1994):

- Dispersão dos resultados: As previsões de desempenho variam consideravelmente, gerando incertezas, mesmo nos EUA;
- Evolução tecnológica: As condições atuais diferem do período do teste original, com novos tipos de veículos, pneus e sistemas de suspensão;
- Forma de deterioração: Os FEC da AASHTO são mais alinhados com a perda de serventia funcional, enquanto as trincas por fadiga do asfalto são mais relevantes no Brasil;
- Tipo de solo: Os solos usados no teste original diferem dos solos brasileiros, possivelmente piores mecanicamente;
- Clima: As condições climáticas do teste original diferem das do Brasil;
- Limitações do Conceito de Número Estrutural: Este conceito destaca camadas intercambiáveis, mas ignora a interação entre os componentes do pavimento;
- Simplificações indevidas: A análise combinada dos eixos dianteiros e traseiros merece atenção, pois pode levar a disparidades nas avaliações de desempenho dos pavimentos.

Já o Método do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), incorporado pelo DNIT (SOUZA, 1981) para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, combina elementos dos métodos do exército americano e da AASHTO. O método utiliza gráficos e FEC do USACE e coeficientes de equivalência estrutural adaptados da AASHTO para as camadas dos pavimentos.

Os Fatores de Equivalência de Cargas são obtidos a partir de uma equação de dimensionamento do exército americano, desenvolvida em 1961. Este método pressupõe várias hipóteses, incluindo a máxima deflexão no topo do subleito, um subleito como um semiespaço único e uma pressão de contato pneu-pavimento uniforme e fixa. No entanto, com o avanço tecnológico, essas premissas se tornaram obsoletas. Por exemplo, os níveis de pressão dos pneus aumentaram e novos modelos consideram pavimentos em camadas, considerando os tipos de materiais e o comportamento elástico linear (CAVA, 2021). Além disso, o método não aborda a principal forma de deterioração dos pavimentos brasileiros, as trincas por fadiga nos revestimentos asfálticos, conforme destacado por Fernandes Junior (1994). Na Tabela 1 são apresentados os FEC adotados pelo DNIT.

Tabela 1. Valores do FEC adotados pelo DNIT (DNIT, 2006b)

Tipo de Eixos	Cargas (tf)	Equações (P em tf)	
		FEC - USACE	FEC - AASHTO
ESRS	0 - 8,0 ≥ 8,0	$FEC = 2,0782 * 10^{-4} * P^{4,0175}$	$FEC = \left(\frac{P}{7,77}\right)^{4,32}$
ESRD		$FEC = 1,8320 * 10^{-6} * P^{6,2542}$	$FEC = \left(\frac{P}{8,17}\right)^{4,32}$
ETD	0 - 11,0 ≥ 11,0	$FEC = 1,5920 * 10^{-4} * P^{3,4720}$ $FEC = 1,5280 * 10^{-6} * P^{5,4840}$	$FEC = \left(\frac{P}{15,08}\right)^{4,14}$
ETT	0 - 18,0 ≥ 18,0	$FEC = 8,0359 * 10^{-5} * P^{3,3549}$ $FEC = 1,3229 * 10^{-7} * P^{5,5789}$	$FEC = \left(\frac{P}{22,95}\right)^{4,22}$



Fator de Equivalência de Carga Empírico-Mecânico

Segundo Fernandes Junior (1994), os modelos empíricos-mecânicos têm como base o desenvolvimento de relações de causa e efeito entre os resultados computacionais (respostas estruturais) e as medidas experimentais (obtidas no campo/laboratório). A aplicação de carga induz uma alteração no estado de tensão da estrutura do pavimento, refletida nas suas respostas estruturais. Estudos teóricos, como os de Fernandes Junior (1994) e Cava (2021), têm demonstrado que algumas dessas respostas estruturais podem ser usadas para prever a progressão de diferentes formas de deterioração, como trincas por fadiga no revestimento asfáltico e deformação permanente nas trilhas das rodas, e, por conseguinte, o desempenho dos pavimentos. Assumindo que os Fatores de Equivalência de Cargas podem ser definidos como a relação entre os danos unitários causados pela carga em análise e pela carga de referência, conforme expresso por:

$$\text{Equação 1: } FEC_i = \frac{N_{8,2}}{N_i}$$

Em que FEC_i é o fator de Equivalência de Cargas para a Solicitação i , $N_{8,2}$ é o número de ciclos de carga considerada padrão e N_i é o número de ciclos de carga prevista de solicitação i . Para o desenvolvimento de Fatores de Equivalência de Cargas empírico-mecânicos, é necessário conhecer, além da hipótese de Miner, a equação (ou modelo) para previsão de desempenho dos pavimentos, que relaciona um determinado nível de deterioração com o número de repetições de uma dada resposta estrutural. Normalmente, o nível de deterioração adotado é aquele que corresponde ao fim da vida útil em serviço (número de repetições admissíveis, N). Os modelos empírico-mecânicos utilizados para previsão da vida útil de um pavimento consideram, geralmente, apenas uma resposta estrutural. Ou seja, procuram prever a evolução de um único tipo de deterioração. Esses modelos apresentam a seguinte forma geral, de acordo com Fernandes Junior (1994):

$$\text{Equação 2: } N_i = K \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^b$$

Em que N é o número admissível de aplicações de carga, k e b são o coeficiente e o expoente associados à forma de deterioração, à resposta estrutural considerada, ao tipo de ensaio e à estrutura analisada, e ε é a resposta estrutural genérica. Fica evidenciada, assim, a possibilidade de se expressar os Fatores de Equivalência de Cargas como uma potência da razão entre as respostas estruturais correspondentes à solicitação em análise (ε_i) e à solicitação-padrão ($\varepsilon_{8,2}$).

$$\text{Equação 3: } FEC = \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{8,2}} \right)^b$$

Conforme a “lei de quarta potência” já mencionada anteriormente, a equação pode ser escrita como:

$$\text{Equação 4: } FEC = \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{8,2}} \right)^4$$

ESTUDO DE CASO: RODOVIA EM MINAS GERAIS

Conforme mencionado anteriormente, os FEC utilizados no Brasil para o cálculo do Número “ N ” são aqueles descritos como métodos empíricos (AASHTO e da USACE). No entanto, ambos apresentam limitações consideráveis que afetam significativamente o dimensionamento. Com o intuito de verificar o impacto da sobrecarga dos veículos, foram obtidos valores de FEC através da metodologia empírico-mecânica, utilizando uma estrutura genérica que representa as estruturas comuns no



DOI: 10.29327/1430212.49-10

EFEITO DO EXCESSO DE CARGA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: ESTUDO DE CASO EM MINAS GERAIS

estado de Minas Gerais. Destaca-se que, embora a metodologia empírico-mecanística também apresente limitações, considera-se que ela é mais adequada para avaliar o impacto no pavimento, pois leva em consideração a estrutura específica do pavimento em estudo. Isso contrasta com o método puramente empírico, que assume que qualquer estrutura de pavimento responde da mesma forma quando submetida à mesma carga.

Em relação ao tráfego, primeiramente foram estudados os dados de pesagem estática, oriundos do Posto de Pesagem localizado na rodovia MGC-354 (km 171 em Patos de Minas/MG). De maneira complementar, foram também empregados dados de outro Posto de Pesagem localizado na MG-050 (km 400 em São Sebastião do Paraíso/MG). As duas rodovias se assemelham quanto ao tráfego dos veículos de carga, principalmente no que concerne à sazonalidade imposta pela safra. Os dados utilizados são do mês de outubro de 2019, considerado um período típico sob o ponto de vista do tráfego, com poucos feriados e sem interferência da pandemia de Covid-19.

Dados de Tráfego

Com base na amostra de aproximadamente 20.000 veículos pesados coletados durante o mês de outubro, foram conduzidas as análises sobre o tráfego. Na rodovia em estudo, registra-se um volume diário de cerca de 760 veículos de carga, cuja distribuição por categoria é detalhada na Figura 1. Destaca-se que os caminhões dos tipos 2C e 3C representam mais da metade (56,3%) do total de veículos comerciais que circulam na área, seguidos pela categoria de veículos do tipo 3S3.

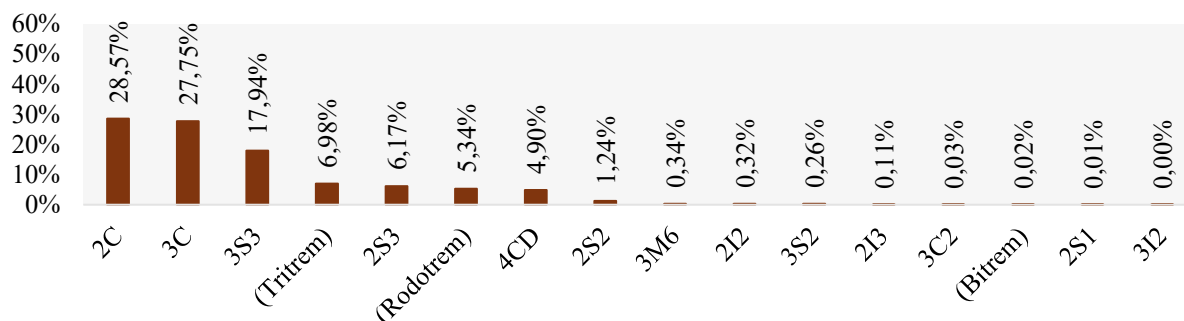


Figura 1. Distribuição de veículos por configuração de eixos (AUTORES, 2024)

Posteriormente, foi analisada a condição de carregamento dos veículos comerciais, subdividindo-os em: carregados abaixo da CML, vazios, excesso entre CML e tolerância, e excesso acima da tolerância (Figura 2).). Para determinar essas condições de carregamento, foram utilizados como referência os valores máximos de carga por eixo fornecidos pelos fabricantes e pelo Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (DNIT, 2006b). Os veículos considerados vazios foram aqueles cujo peso medido era inferior ou próximo à tara do caminhão por tipo, dado fornecido pelo DER-MG.

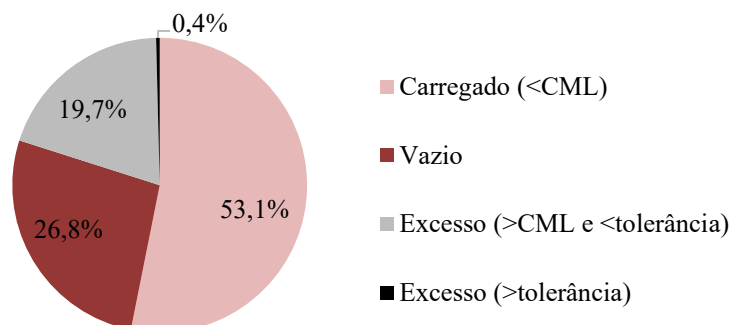


Figura 2. Situação do carregamento do total de veículos (AUTORES, 2024)

Conforme apresentado na Figura 2, mais da metade dos veículos comerciais avaliados trafegam carregados, enquanto um pouco mais de um quarto estão descarregados (vazios). O percentual de veículos dentro da tolerância é alto, cerca de 20%, e 0,4% trafegam acima do que é permitido pela legislação. Entretanto, como destacado por Fernandes Junior (1994), Cava (2021) e Inoue (2023), é importante ressaltar que o excesso de carga, mesmo em baixos percentuais, pode causar danos à infraestrutura viária, uma vez que esse valor não é considerado no dimensionamento do pavimento. Considerando apenas os veículos comerciais que excederam a tolerância, totalizando 85 no período analisado, foi calculado o percentual médio de excesso em relação ao peso bruto total (PBT) e esse é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Excesso médio em relação ao limite por categoria (AUTORES, 2024)

Categoria	Excesso médio [ton]	Carga em excesso / máxima permitida [%]
2S2	8,782	25%
2C	2,966	18%
3M6	9,950	13%
2I2	4,387	12%
3S3	2,536	5%
3C	1,170	5%
Rod.	1,100	1%
2S3	0,315	1%

Além disso, também foi calculado o excesso médio por grupo de eixos, e os resultados podem ser observados na Tabela 3. É possível notar que o veículo do tipo 2S2 foi o que apresentou maior excesso no período e local analisados, atingindo quase 50% de sobrecarga no segundo grupo de eixos. Por outro lado, o veículo 2I2 registrou uma sobrecarga de mais de 50% no quarto grupo de eixos, enquanto o 2C ultrapassou 30% no eixo traseiro. A distribuição de carga por eixo está diretamente associada ao desempenho do pavimento e, por esse motivo, entender a distribuição das cargas por eixo e seu percentual de sobrecarga é extremamente importante para prever a vida útil e projetar pavimentos mais duráveis.



DOI: 10.29327/1430212.49-10

EFEITO DO EXCESSO DE CARGA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS:
ESTUDO DE CASO EM MINAS GERAIS

Tabela 3. Percentual de excesso por grupo de eixos (AUTORES, 2024)

Categoria	Grupo de eixos				
	1	2	3	4	5
2S2		49,0%	37,2%		
2C		30,4%			
3M6	3,2%	2,6%			
2I2	2,7%			50,6%	
3S3	5,4%	7,7%			
3C	1,9%	1,2%			
Rod.	7,5%	4,6%	6,1%		
2S3			3,6%		

Pavimento com Estrutura Genérica para o Estado de Minas Gerais

Para obter os fatores de equivalência de carga, primeiramente definimos uma estrutura que representa a malha rodoviária de Minas Gerais, com base em dados históricos fornecidos pela Gerência de Ativos Rodoviários (GAR) do DER-MG e apresentada na Tabela 4. De acordo com esses dados, observou-se um CBR de 8% para o subleito nas proximidades dos locais onde foram realizados os estudos de tráfego. Embora esse valor seja considerado relativamente alto, seu desempenho é justificado pela presença de latossolos na região, que podem ter passado pelo processo de laterização. Ressalta-se que a rigidez das camadas e os valores de Poisson, no entanto, foram obtidos por aproximação, utilizando a IP-08/2004 – Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento e a IP-DE-P00/001 – Projeto de Pavimentação.

Tabela 4. Estrutura Genérica do Pavimento (AUTORES, 2024)

Estrutura Dimensionada	Espessura (cm)	Material	Módulo (Mpa)	Poisson
Revestimento	5,0	CBUQ	4.000	0,30
Base	15,00	Material Granular	300	0,35
Sub-base	15,00	Solo	200	0,35
Subleito (8%)	-	Solo	680	0,40

A estrutura definida possibilitou o estudo das variações dos fatores de equivalência de carga, levando em conta os eixos simples de rodagem dupla identificados durante as análises de tráfego, juntamente com os diferentes carregamentos observados na Tabela 3. Além disso, foram avaliados os efeitos da pressão de enchimento dos pneus nos fatores de veículos, com base em pesquisas como as de Cava (2021), que abordam a influência desse parâmetro na deterioração do pavimento.

Para calcular os esforços de tração no revestimento e de compressão no subleito, utilizou-se o programa computacional Elastic Layered System (ELSYM5), desenvolvido nos anos 1980. O ELSYM5 emprega o método das diferenças finitas para analisar tensões, deformações e deslocamentos em sistemas de camadas elásticas. O programa, de acordo com Medina e Motta (2015), considera as propriedades dos materiais e as cargas aplicadas, permitindo até cinco camadas isotrópicas no pavimento. Assim, na Tabela 5 podem ser observados os eixos e as respectivas sobrecargas que foram analisadas, bem como as diferentes pressões de enchimento.



ANA CAROLINA FELÍCIO BICALHO,
THAIS BERGERBARBOSA DA SILVA,
BRUNA CRISTINA BELTRÃOSILVA BELEIGOLI,
JOSÉ MARIA DOS SANTOS

Tabela 5. Carga por eixo e pressão de enchimento avaliadas no ELSYM5 (AUTORES, 2024)

Eixo Simples de Rodagem Duplas					
Carga por Eixo (t)	% Sobrecarga por Eixo	Pressão de Enchimento (psi)			
8	0,00	80			
10	0,00	80	100	120	
10	12,50	80	100	120	
10	20,00	80	100	120	
10	30,00	80	100	120	
10	40,00	80	100	120	
10	50,00	80	100	120	

Os FEC foram calculados utilizando a Equação 4 para as respostas estruturais das tensões de tração na fibra inferior do revestimento e das tensões de compressão vertical no topo do subleito. Com base na estrutura genérica, foram simulados diversos carregamentos, conforme a Tabela 3. Destaca-se que os percentuais de sobrecarga foram definidos com base nas observações de campo, que indicam eixos com considerável variabilidade de excesso de carga. Optou-se por selecionar os eixos simples de rodagem dupla para comparar o aumento da carga e o potencial de deterioração do pavimento. O impacto do aumento da carga e da pressão de enchimento foi comparado tanto para os fatores de fadiga quanto para os fatores de deformação permanente. Tendo em vista a variabilidade de veículos encontrados, os FEC não foram calculados para todos os eixos, portanto, recomenda-se que este estudo seja expandido futuramente.

RESULTADOS

Primeiramente, vale ressaltar que os fatores de equivalência de carga estão relacionados à resposta estrutural do pavimento à aplicação da carga considerada, portanto, estão associados à sua deterioração. A seguir, são apresentados os gráficos (Figura 3 e Figura 4) que mostram a influência da sobrecarga e da pressão de enchimento nos FEC em relação à fadiga e às deformações permanentes.

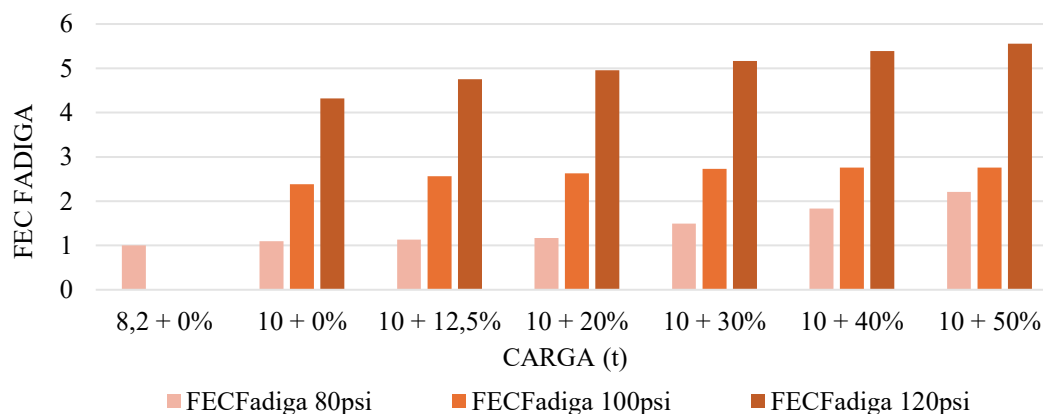


Figura 3. Influência da Pressão de enchimento e da sobrecarga no FEC de Fadiga (AUTORES, 2024)



DOI: 10.29327/1430212.49-10

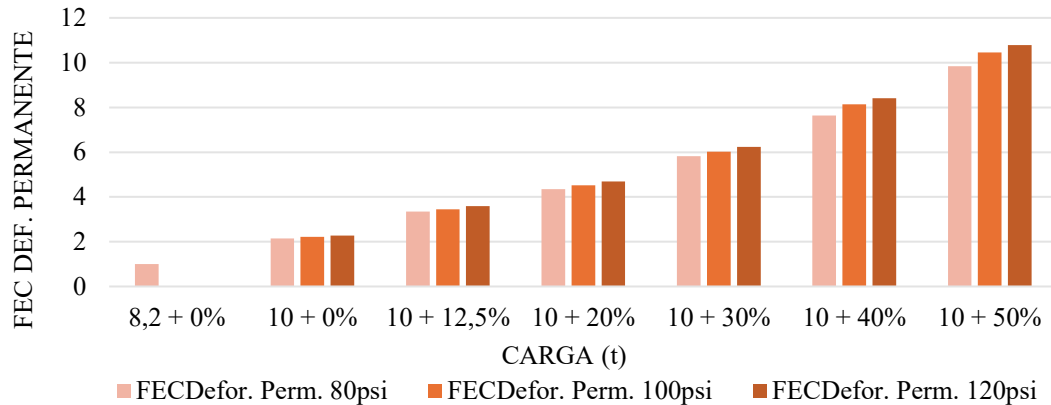
EFEITO DO EXCESSO DE CARGA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS:
ESTUDO DE CASO EM MINAS GERAIS

Figura 4. Influência da Pressão de enchimento e sobrecarga no FEC de Deformação Permanente (AUTORES, 2024)

No que diz respeito aos FEC de fadiga, percebe-se uma relação direta com o aumento da carga por eixo, considerando a espessura de 5 cm adotada. Salienta-se a importância da consideração correta da pressão dos pneus, já que um aumento dela resulta no aumento considerável do FEC de fadiga e, conseqüentemente, na redução da vida útil do pavimento. É importante ressaltar, conforme observado por Cava (2021), que a maioria dos veículos comerciais utiliza pressões de pneus muito superiores àquela considerada no eixo-padrão, 80 psi (552 kPa) e este aumento da pressão contribui muito para uma degradação mais rápida do pavimento.

No que se refere aos FEC de deformação permanente, nota-se que a pressão dos pneus não influencia tanto para uma mesma carga aplicada, porém é evidente que um aumento da carga por eixo tem um impacto significativo no pavimento. O Fator de Equivalência de Cargas (FEC) do eixo padrão foi cerca de cinco vezes menor do que o FEC considerando uma sobrecarga de 50% por eixo. De maneira geral, ambos os cenários revelam uma capacidade destrutiva muito superior ao que é normalmente previsto.

Os resultados destacam a importância da consideração da falha por fadiga nos processos de dimensionamento no Brasil – normalmente, ignorada. Essa lacuna contribui para a necessidade frequente de manutenção nas rodovias, logo após sua abertura ao tráfego. Além disso, como mencionado por Inoue (2023), as espessuras de pavimento geralmente adotadas no Brasil, em torno de apenas 5 centímetros, são consideravelmente menores do que em outros países, evidenciando ainda mais a situação precária da pavimentação no país. Segundo Cava (2021), é importante considerar que, devido às espessuras esbeltas, os pavimentos têm sua vida útil drasticamente reduzida, chegando a perder até 90% dela. Portanto, adotar espessuras adequadas ao tráfego local é fundamental. À medida que a espessura do revestimento aumenta, a estrutura torna-se mais resistente à flexão, reduzindo assim a influência da pressão dos pneus nessas estruturas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo proporcionou uma análise detalhada e quantitativa do impacto dos veículos com excesso de carga no pavimento. Através da avaliação dos fatores de equivalência de carga, foi possível entender como o aumento da carga por eixo e as pressões de enchimento dos pneus influenciam na degradação do pavimento.

Além disso, constatou-se que a adoção de métodos empírico-mecanísticos, que levam em conta as respostas estruturais reais dos pavimentos, pode contribuir significativamente para prolongar a vida



útil dos pavimentos e reduzir os custos de manutenção. Entretanto, é importante destacar que esses métodos também possuem limitações, pois nem sempre consideram fatores externos que podem impactar na vida útil do pavimento, como o envelhecimento, manutenção, variações climáticas e outras condições.

No que diz respeito à "*lei de quarta potência*", uma limitação identificada é a falta de consideração das possíveis variações nas potências em função do tipo de veículo. Isso é relevante, pois determinar essas variações pode ser crucial para calcular com maior precisão o dano causado por diferentes tipos de cargas. Contudo, optou-se por adotar o método empírico mecânico no estudo, pois representa uma abordagem mais conservadora, já que os FEC empíricos foram calculados em locais com pavimentos estruturalmente superiores aos encontrados no Brasil.

No contexto do dimensionamento do pavimento, embora algumas metodologias não considerem a tolerância prevista na Lei da Balança, alguns órgãos, como o DER-MG, adotam abordagens mais realistas ao levar em conta os percentuais de tolerância estabelecidos na legislação. No entanto, é importante ressaltar que dimensionar o pavimento para usuários que trafegam com excesso de carga é desafiador devido à variação significativa desse fator, influenciada por fatores econômicos, sazonais, tipos de veículos, entre outros. Nesse contexto, considerar a tolerância no cálculo do Número "N" já contribui para prolongar a vida útil, embora não elimine completamente o risco de falha estrutural antes do previsto.

Os resultados foram obtidos em um local com fiscalização vigente e, mesmo com a possibilidade de multas, alguns usuários optaram por trafegar com cargas acima do permitido pela legislação. Portanto, é importante considerar a possibilidade de que em outros trechos rodoviários, sem a presença de equipamentos de fiscalização, o excesso de carga seja ainda maior do que o detectado neste estudo.

DOI: [10.29327/1430212.49-10](https://doi.org/10.29327/1430212.49-10)EFEITO DO EXCESSO DE CARGA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS:
ESTUDO DE CASO EM MINAS GERAIS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernucci, L. B.; Vallejo, L. **Avaliação do comportamento de pavimentos flexíveis utilizando o conceito de fatores de equivalência de cargas (FEC)**. *Revista de Infraestrutura Rodoviária*, v. 4, n. 2, p. 1-20, 2019. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14229.htm>. Acesso em: 23 abril 2024.

BRASIL. Lei nº 14229, de 21 de outubro de 2021. Brasília, Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14229.htm>. Acesso em: 08 maio 2023.

Cava, F. H. **Análise da influência da pressão de enchimento dos pneus e da condição de aderência entre camadas no dimensionamento de pavimentos flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. 144 f. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/D.3.2021.tde-24112021-141416>>. Acesso em: 28 abril 2024.

Confederação Nacional do Transporte (CNT). *Informe CNT: Excesso de cargas aumenta custo das empresas*. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/informe-cnt-excesso-aumenta-custos-empresas>>. Acesso em: 08 maio 2023.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006. 222 p. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigida_errata_1.pdf>. Acesso em: 21 abril 2024.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). *Manual de Estudos de Tráfego*. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006. 200 p. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723_manual_estudos_trafego.pdf>. Acesso em: 21 abril 2024.

Fernandes Junior, J. L. **Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos**. São Carlos, SP, 1994. 293 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Acesso em: 23 abril 2024.

FRANCO, F. A. C. P. *Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav*. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2007.

HIGHWAY RESEARCH BOARD. *Report 7: Summary report – Publication n° 1061*. Washington, DC: National Academy of Sciences – National Research Council, Division of Engineering and Industrial Research, 1962.

Hussain, S.; Parker, N. A. **Pavement damage and road pricing**. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Washington, D. C., v. TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM, 2006.

Inoue, Danilo Keniti Nais. **Consideração do Efeito do Tráfego para Fins de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis e de Dosagem de Misturas Asfálticas**. São Carlos, 2023. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo.

Medina, J.; Motta, L. M. G. *Mecânica dos Pavimentos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

SOUZA, M.L. *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis*. Rio de Janeiro: DNER, 1981.

TREYBIG, H.G.; VON QUINTUS, A. *Equivalency Factor Analysis and Prediction for Triple Axles - Report BR-2/1*. Austin: Austin Research Engineers, 1976.

TURNBULL, W.J.; FOSTER, C.R.; AHLVIN, R.G. *Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*. In: *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Ann Arbor: The University of Michigan, 1962.



COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS 3D E 3D AXISSIMÉTRICO NA ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO VERTICAL DO SUBLEITO SOB CARGA AEROPORTUÁRIA

Lucas Cavalcante de Almeida¹; Mateus de Oliveira Serafim² & Francisco Heber Lacerda de Oliveira³

RESUMO

O dimensionamento de pavimentos aeroportuários é um processo que afeta diretamente a segurança e a eficiência das operações aeroportuárias. Alguns *Softwares* são usados para modelar as respostas do pavimento sob carga aeroportuária, mas essas análises, geralmente, consideram simplificações que podem não refletir com exatidão o comportamento do pavimento. Este estudo comparativo utilizou o *software* de análise de elementos finitos ABAQUS 2020 para desenvolver modelos 3D e 3D axissimétricos, comparando-os com os dados obtidos pelo *software* AEMC, uma ferramenta bidimensional com análise elástica das camadas. O objetivo foi verificar a deformação vertical no topo do subleito, simulando a aplicação de carga de uma aeronave modelo *Airbus A320*. Foi observado que os valores de deformação gerados pelo modelo 3D foram inferiores aos do AEMC, com diferenças de 16,74% embaixo da roda e 1,03% entre rodas, demonstrando uma subestimação por parte do modelo 3D. No entanto, o tempo de processamento do modelo 3D foi mais lento que o AEMC, apontando um possível impeditivo de sua aplicação em situações que requerem múltiplas simulações iterativas. O modelo 3D axissimétrico, por outro lado, mostrou-se mais eficiente em termos de processamento, com pequenas diferenças de deformação quando comparado com o AEMC. Conclui-se que a adoção de modelos 3D, em particular o modelo 3D axissimétrico, pode ser uma abordagem eficiente e precisa para a simulação de pavimentos aeroportuários, equilibrando resultados e eficiência no processamento.

PALAVRAS-CHAVE: Deformação; Modelos Tridimensionais; Processamento.

ABSTRACT

The design of airport pavements is a process that directly affects the safety and efficiency of airport operations. Some software programs are used to model pavement responses under airport load, but these analyses generally consider simplifications that may not accurately reflect pavement behavior. This comparative study used the finite element analysis software ABAQUS 2020 to develop 3D and 3D axisymmetric models, comparing them with data obtained from the AEMC software, a two-dimensional tool with layered elastic analysis. The objective was to verify the vertical deformation at the top of the subgrade, simulating the load application of an *Airbus A320* aircraft. It was observed that the deformation values generated by the 3D model were lower than those of the AEMC, with differences of 16.74% under the wheel and 1.03% between wheels, demonstrating an underestimation by the 3D model. However, the processing time of the 3D model was slower than the AEMC, indicating a potential impediment to its application in situations requiring multiple iterative simulations. On the other hand, the 3D axisymmetric model proved more efficient in terms of processing, with small deformation differences when compared to the AEMC. It is concluded that the adoption of 3D models, particularly the 3D axisymmetric model, can be an efficient and accurate approach for the simulation of airport pavements, balancing results and processing efficiency.

KEY WORDS: Deformation; Three-dimensional models; Processing.

^{1,3} Universidade Federal do Ceará - UFC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes - PETRAN, Campus de Fortaleza, lucascavalcante@det.ufc.br; heber@det.ufc.br.

² Universidade Federal do Ceará - UFC, Campus de Fortaleza, mateuserafim3@alu.ufc.br.



DOI: [10.29327/1430212.49-7](https://doi.org/10.29327/1430212.49-7)

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS 3D E 3D AXISSIMÉTRICO
NA ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO VERTICAL DO SUBLEITO SOB CARGA AEROPORTUÁRIA

INTRODUÇÃO

O aumento constante no número de operações aeroportuárias e a necessidade de infraestrutura aeroportuária mais robusta têm impulsionado tanto o desenvolvimento quanto a renovação de pavimentos aeroportuários. No entanto, a manutenção de estruturas, como as pistas de pouso e decolagem, frequentemente não acompanha o ritmo necessário das operações aeroportuárias, contribuindo para a deterioração desses pavimentos. Essa deterioração pode resultar de vários fatores, incluindo as condições climáticas, o desgaste natural ao longo do tempo e as cargas aeroportuárias. Tal degradação é um fator significativo na ocorrência de incidentes e acidentes aeronáuticos, destacando a importância de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) mais robusto (OLIVEIRA, 2016).

Na indústria aeronáutica, a constante busca por expandir o alcance das aeronaves tem resultado no aumento do peso bruto operacional e da pressão dos pneus. Conforme Garg *et al.* (2018), isso demanda pavimentos aeroportuários com maior capacidade estrutural. Esse desenvolvimento requer uma adequação em relação aos métodos de dimensionamento de pavimentos atualmente utilizados no Brasil, que frequentemente se baseiam em práticas internacionais. É necessário verificar se os pavimentos das pistas de pouso e decolagem presentes no país são capazes de suportar essa elevação do peso bruto operacional.

Devido à ausência de um método nacional para o dimensionamento de pavimentos aeroportuários, os procedimentos desenvolvidos pela *Federal Aviation Administration* (FAA) são os mais utilizados no Brasil, conforme indicado por Ramos *et al.* (2017). Uma vantagem significativa dessa abordagem do *software* FAARFIELD, desenvolvido pela FAA, é a flexibilidade para ajustar parâmetros de cálculo, incluindo tipos de aeronaves, volume de tráfego, vida útil projetada, e a capacidade de suporte do subleito e das camadas subjacentes.

O *software* FAARFIELD, por meio do método LEAF (*Layered Elastic Analysis Program*), é amplamente utilizado para analisar pavimentos aeroportuários. No entanto, Shafabakhsh, Kashi e Akbari (2016) destacam que, apesar de sua ampla aceitação e fácil implementação, o LEAF enfrenta limitações significativas ao fornecer respostas estruturais imprecisas. Uma dessas limitações é a suposição de cargas axissimétricas na camada superficial, o que não reflete a realidade das cargas de rodas reais. Essa premissa leva frequentemente a um superdimensionamento do pavimento.

Em contraste, o método de Elementos Finitos (FE) em simulações tridimensionais (3D) oferece uma modelagem mais realista das condições de carga e interações dos materiais, proporcionando uma análise estrutural detalhada do comportamento do pavimento sob diferentes cenários de carga. Diante do exposto, o objetivo deste estudo é verificar a eficácia dos modelos 3D em comparação aos modelos 3D axissimétricos na obtenção de valores de deformação no topo do subleito (dado utilizado para dimensionamento de pavimentos aeroportuários), utilizando dados de simulações dos *softwares* ABAQUS 2020 e do AEMC para quantificar essas deformações e medir o impacto no tempo de simulação.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



De acordo com Franco (2007), a resposta estrutural de um pavimento, considerando a caracterização dos materiais como módulos de resiliência e o coeficiente de Poisson, assim como a composição do tráfego, pode ser estimada calculando as tensões, deformações e deslocamentos gerados na estrutura. Existem diversas ferramentas computacionais que empregam algoritmos para realizar esses cálculos. Segundo Heymsfield e Tingle (2019), o Método de Elementos Finitos (MEF) é frequentemente utilizado em pavimentos rígidos, enquanto a abordagem *Layered Elastic Design* (LED) é mais comum para pavimentos flexíveis. A Tabela 1 apresenta alguns *softwares* de análise estrutural utilizados em pavimentos flexíveis.

Tabela 1. *Softwares* utilizados em projetos de pavimentos flexíveis (adaptado de HEYMSFIELD E TINGLE, 2019)

<i>Software</i>	Tipo de análise
ILLI-SLAB	MEF – 2D axissimétrico
MICH PAVE	MEF – 2D axissimétrico
ABAQUS	MEF – 3D
AEMC	LED
DAMA	LED
KENLAYER	LED
CIRCLY	LED

Em 1995, a FAA incorporou o *software* LEDFAA, um método empírico-mecanicista baseado na teoria da elasticidade, que, apesar de sua ampla aceitação, possui limitações ao assumir que todas as camadas são elásticas lineares e que as cargas aplicadas são axissimétricas, o que não reflete a realidade de muitos trens de pouso. Shafabaksh, Kashi e Akbari (2016) afirmam que essas limitações podem ser superadas pelo uso de análise tridimensional por meio de elementos finitos, que oferecem uma simulação mais realista e precisão superior em parâmetros de tensão e deformação. Hernandez e Al-Qadi (2015) confirmam essa eficácia ao comparar resultados de simulações de decolagem de aeronaves pesadas em *softwares* que utilizam a teoria elástica linear e elementos finitos, demonstrando uma maior exatidão na deformação do subleito em velocidades variadas de decolagem, destacando a superioridade do método de elementos finitos sobre abordagens mais tradicionais como o LEDFAA. Vale ressaltar que não foram realizados comparativos com resultados de campo em condições controladas para as afirmações dos autores supracitados.

A análise de pavimentos aeroportuários, especialmente sob cargas elevadas de aeronaves como o *Boeing B-777* e *Airbus A-380*, requerem modelagens precisas das interações entre os pneus e as camadas do pavimento. Estudos como os de Myers, Roque e Birgisson (2001) e Kim (2007) indicam que, embora modelos tridimensionais (3D) ofereçam maior exatidão ao representar a estrutura real do pavimento, eles demandam mais recursos e tempo de processamento quando comparados a análises bidimensionais (2D), que ainda podem ser úteis ao reduzir a complexidade computacional.

Modelos 2D, embora úteis, falham em simular a forma elíptica real das cargas aplicadas por pneus (Raposo, 2017), enquanto modelos axissimétricos simplificam a carga para uma forma circular e não podem representar arranjos de rodas em tandem ou múltiplas, limitações que são significativas ao considerar a interação complexa de trens de pouso mais pesados. Rezende e Vicentini (2021) reforçam que as elevadas tensões e deformações em pavimentos aeroportuários, que são mais intensas do que em rodoviários, justificam a necessidade de estudos detalhados e a adoção de modelos 3D



DOI: 10.29327/1430212.49-7

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS 3D E 3D AXISSIMÉTRICO NA ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO VERTICAL DO SUBLEITO SOB CARGA AEROPORTUÁRIA

através do Método de Elementos Finitos (MEF) para uma melhor representação das condições reais de carga e interação entre os materiais.

MÉTODO DE PESQUISA

A carga aeroportuária utilizada neste estudo foi baseada nas especificações da aeronave *Airbus A-320*, que possui um peso máximo de decolagem (PMD) de 73.900 kg. A pressão exercida pelos pneus é de 1,378 MPa. A área de contato, considerada retangular, foi de 124.690 mm² com a medida *a* igual a 31,5 cm e medida *b* igual a 39,58 cm (Figura 1). Todas essas informações foram extraídas do *software* FAARFIELD versão 2.1.1. O trem de pouso dessa aeronave utilizada caracteriza-se por ser do tipo eixo simples de rodas duplas (ESRD). Para a simulação utilizou-se o semi-eixo da aeronave.



Figura 1. Medidas para área de contato entre pneu e pavimento (AUTORES, 2024).

A Tabela 2 mostra a descrição do pavimento utilizado na simulação. Essas configurações foram utilizadas em todos os cenários de simulação (modelo 3D, modelo 3D axissimétrico e AEMC).

Tabela 2. Características do pavimento (AUTORES, 2024).

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Revestimento	20	2000	0,30
Base	30	400	0,35
Sub-base	40	200	0,35
Subleito	∞	150	0,40

Elaboração da Simulação no *Software* ABAQUS 2020

O modelo tridimensional foi construído representando as camadas do pavimento: revestimento, base, sub-base e subleito. Cada camada foi modelada como um sólido homogêneo com propriedades elásticas lineares específicas. Foram elaboradas duas geometrias: um modelo 3D e um modelo 3D axissimétrico (Figura 2).

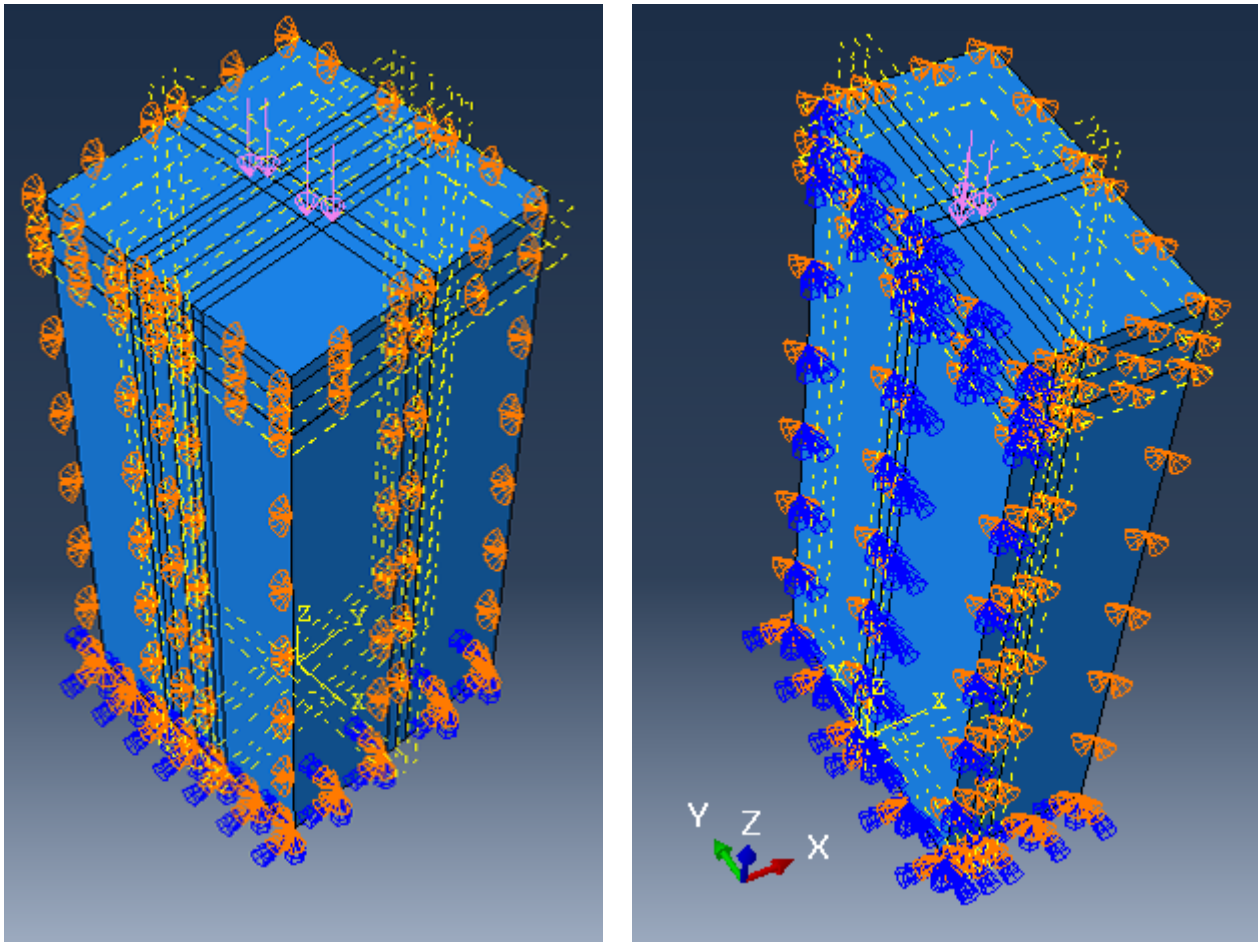


Figura 2. Modelo de pavimento com representação 3D e 3D axissimétrico (AUTORES, 2024).

As condições de contorno foram aplicadas para simular o comportamento do pavimento quando submetido ao carregamento. As bordas do modelo foram restritas para simular a continuidade infinita do pavimento. A base do subleito foi fixada em todos os graus de liberdade para simular a condição de engaste. Para o cálculo da espessura do subleito, bem como das dimensões de comprimento e largura do pavimento, foi adotada a metodologia descrita por Franco (2004) para pavimentos rodoviários. Nessa abordagem, a espessura do subleito foi definida como aproximadamente, 40 vezes o raio correspondente à área de contato, assumida como circular para simplificação do cálculo. As dimensões radiais, correspondentes à largura e ao comprimento do pavimento, foram estabelecidas em 20 vezes o raio definido. Quanto à configuração da malha utilizada na simulação numérica por elementos finitos, Zanetti (2008) ressalta a importância da otimização da malha. Esse processo permite a redução do tamanho dos elementos da malha sem que haja prejuízo à exatidão dos resultados obtidos nas análises.

Análise e Pós-processamento

Foram realizadas análises estáticas para avaliar as deformações resultantes. Os resultados foram extraídos especificamente no topo do subleito (embaixo da roda e entre rodas), local crítico para avaliação da integridade estrutural do pavimento (ZANETTI, 2008). Para evitar possíveis distorções



DOI: 10.29327/1430212.49-7

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS 3D E 3D AXISSIMÉTRICO NA ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO VERTICAL DO SUBLEITO SOB CARGA AEROPORTUÁRIA

presentes nas interfaces entre as camadas, optou-se por extrair os valores de deformação a uma distância de 0,5 cm abaixo da interface entre a sub-base e o subleito. Essa abordagem foi escolhida para evitar potenciais distorções nos dados que poderiam ser causadas pelas variações materiais na interface. As análises de pós-processamento incluíram a visualização da distribuição de deformação, além de verificar a adequação das espessuras das camadas e a capacidade do pavimento em suportar as cargas aplicadas em um modelo 3D e um modelo 3D axissimétrico. O modelo foi comparado com resultados de modelos reproduzidos no *software* AEMC.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise da *Mesh* (Malha) e Tempo de Processamento – Modelo 3D e Modelo 3D Axissimétrico

A análise das deformações no topo do subleito revelou que a variação no tamanho da malha tem um impacto limitado nos resultados quando o tamanho é igual ou superior a 15 cm. Conforme evidencia a Figura 3, as deformações medidas diretamente abaixo da carga da roda e no ponto entre as rodas permanecem consistentes para todos os tamanhos de malha. Ficou evidente que malhas mais finas não resultam em variações significativas das deformações no topo do subleito (entre rodas e embaixo da roda) para o intervalo de tamanho testado.

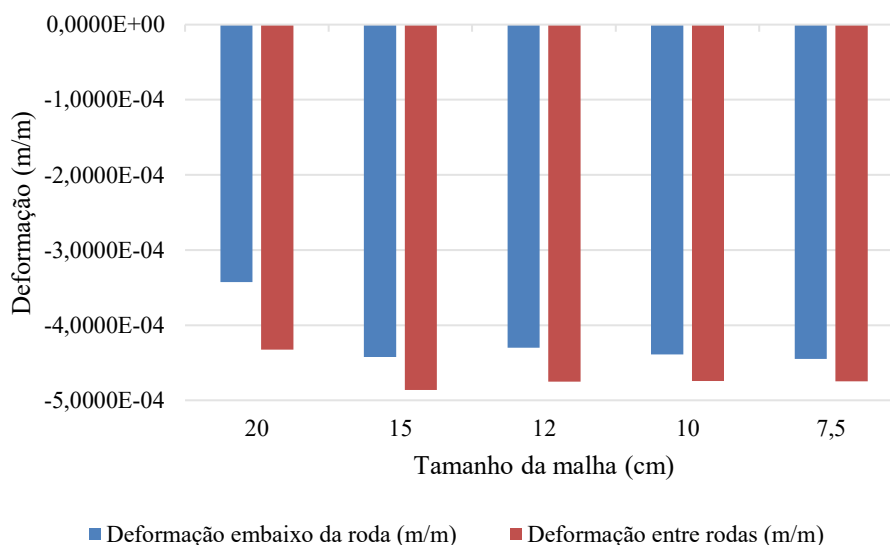


Figura 3. Deformação no topo do subleito – Modelo 3D (AUTORES, 2024).

No entanto, foi percebido que o tamanho da malha influencia diretamente o tempo de processamento computacional, com tempos mais longos associados a malhas mais discretizadas. Portanto, recomenda-se uma malha de 15 cm (do tipo tetraédrica) como uma escolha otimizada para balancear precisão e eficiência em simulações computacionais de pavimentos aeroportuários utilizando o *software* ABAQUS 2020. Os dados de tempo de simulação estão expostos na Tabela 3.



Tabela 3. Tempo de simulação (AUTORES, 2024).

Tamanho da malha (cm)	Tempo de simulação (s)	
	Modelo 3D	Modelo 3D Axissimétrico
20	32	10
15	73	29
12	151	71
10	881	164
7,5	2441	1233

Comparativo entre Deformações no Topo do Subleito para Modelo 3D e Modelo 3D Axissimétrico

Embora as simulações individuais nos modelos 3D e 3D axissimétricos apresentem tempos de processamento de 73 s e 29 s, respectivamente, essa diferença torna-se considerável quando for executado um elevado número de simulações, como é frequentemente o caso em estudos que empregam Redes Neurais Artificiais (RNA). Nesse contexto, a eficiência computacional é afetada e o tempo acumulado economizado em simulações axissimétricas pode contribuir para a viabilidade e velocidade de processamento. Portanto, ao planejar estudos envolvendo múltiplas simulações, a escolha entre um modelo 3D e sua versão axissimétrica pode impactar não apenas a precisão dos dados, mas também a eficiência do tempo do processo de análise.

Os valores de deformação obtidos pelo modelo 3D foram $-4,4254E-04$ m/m embaixo da roda e $-4,8630E-04$ m/m entre rodas, enquanto o modelo 3D axissimétrico mostrou $-4,2125E-04$ m/m e $-4,8478E-04$ m/m, respectivamente. A Tabela 4 resume o comparativo entre os métodos de análise incluindo o *software* AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) v.2.4.6.

Tabela 4. Comparativo entre modelos (AUTORES, 2024).

Modelo/Software	Deformação (m/m) x 10^{-4}		Diferença (%) entre deformações		Tempo de processamento (s)
	Embaixo da roda	Entre rodas	Embaixo da roda	Entre rodas	
3D	-4,4254	-4,8630	-	-	73
3D axissimétrico	-4,2125	-4,8478	4,81	0,31	29
AEMC	-5,1661	-4,9133	-16,74	-1,03	0,004

A diferença entre os dois modelos é de aproximadamente 4,8% embaixo da roda e 0,3% entre rodas. Embora as diferenças percentuais sejam pequenas, em termos de dimensionamento de pavimentos, mesmo pequenas variações podem influenciar a previsão da vida útil do pavimento. Ao considerar que a vida útil do pavimento é proporcional à capacidade do pavimento de resistir a deformações sob carga, uma diferença de 4,8% na deformação pode levar a uma alteração na previsão do número de coberturas (passagens de aeronaves) que o pavimento pode suportar antes de atingir o critério de falha.

Em resumo, cada modelo apresenta vantagens e desvantagens em termos de deformação e tempo de processamento. O modelo 3D axissimétrico e o AEMC são mais eficientes em termos de tempo de processamento, mas apresentam maior deformação em comparação com o modelo 3D. Considerou-se o modelo 3D como a referência, pois por apresentar maior quantidade de nós e conseqüentemente maior quantidade de iterações e equações diferenciais a serem resolvidas, a exatidão nos valores



DOI: [10.29327/1430212.49-7](https://doi.org/10.29327/1430212.49-7)

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS 3D E 3D AXISSIMÉTRICO NA ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO VERTICAL DO SUBLEITO SOB CARGA AEROPORTUÁRIA

deformação podem ser alcançadas. Portanto, a escolha do modelo apropriado para o projeto de pavimentação aeroportuária dependerá das necessidades específicas, como a capacidade de carga das aeronaves, o volume de tráfego, a frequência de manutenção necessária e os recursos computacionais disponíveis. Essas prioridades determinarão qual modelo pode oferecer o melhor equilíbrio entre precisão e eficiência para um projeto específico.

CONCLUSÃO

Esse estudo destacou a importância da modelagem de simulação apropriada para o cálculo da deformação no topo subleito em pavimentos aeroportuários, enfatizando a eficiência computacional. A comparação entre os modelos 3D, 3D axissimétrico e o *software* AEMC possibilitou verificar como diferentes abordagens podem influenciar os resultados da deformação causada no topo do subleito, parâmetro importante para a avaliação da vida útil dos pavimentos, já que esse parâmetro é utilizado no dimensionamento do pavimento.

Esses resultados evidenciaram a relevância de selecionar uma metodologia de simulação adequada que não só fornece resultados satisfatórios, mas também otimiza o uso de recursos computacionais. Isso é pertinente quando a simulação é aplicada em escala, como em análises iterativas ou na alimentação de dados para Redes Neurais Artificiais, nas quais o volume de dados e o tempo de processamento (a depender da quantidade de dados disponíveis) se tornam fatores críticos. Portanto, enquanto o AEMC fornece uma base para comparação, pois é um *software* consagrado na análise de tensão e deformação de pavimentos, os modelos 3D e 3D axissimétrico aplicados no ABAQUS 2020 demonstram ser alternativas eficientes, oferecendo uma alternativa favorável entre exatidão e eficiência computacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMC: versão 2.4.6 [software]. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2023.
- Franco, F.A.C.P. Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2007.
- Garg, N., Kazmee, H., Ricalde, L., & Parsons, T. Rutting evaluation of hot and warm mix asphalt concrete under high aircraft tire pressure and temperature at national airport pavement and materials research center. *Transportation Research Record*, 2672(23), 117-127. 2018.
- Hernandez, J. A., & Al-Qadi, I. L. Airfield pavement response caused by heavy aircraft takeoff: Advanced modeling for consideration of wheel interaction. *Transportation Research Record*, 2471(1), 40-47. 2015.
- Heysfield, E. e Tingle, J. State of the practice in pavement structural design/analysis codes relevant to airfield pavement design. *Engineering Failure Analysis*, 105, 12–24. 2019.
- Kim, M. Análise tridimensional de elementos finitos de pavimentos flexíveis considerando o comportamento não linear da fundação do pavimento. dissertação de doutorado, Universidade de Illinois em UrbanaChampaign. 2007.
- Myers, L. A., Roque, R., & Birgisson, B. Use of two-dimensional finite element analysis to represent bending response of asphalt pavement structures. *International Journal of Pavement Engineering*. 2001.
- Oliveira, F. H. L. Desenvolvimento de um modelo de gerenciamento de pavimentos aeroportuários como apoio à tomada de decisão sobre estratégias de manutenção e reabilitação. 178 f. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2016.
- Raposo, S. Pavimentos Rodoviários: Análise Estrutural e Desempenho. 1ª ed. Lisboa: Editora Ex-Libris, 2017.



Ramos, B. A. S., Lima, D. C., Pitanga, H. N., e Silva, T. O. Aplicação de métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da FAA ao Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek. *TRANSPORTES*, 25(4), 57-67. 2017.

Rezende, C. W. de A., & Vicentini, D. F. Estudo da influência do a380 sobre pavimentos flexíveis aeroportuários nas condições de contorno Study of the influence of a380 on airport flexible sidewalks under boundary conditions. *Brazilian Journal of Development*, 7(3), 28817-28836. 2021.

Shafabakhsh, G. A., Kashi, E., & Akbari, A. A comparison effect of aircraft main gear configuration on runway damages by LED and FE method. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 14(2), 362-372. 2016.

Zanetti, F. S. O uso de redes neurais artificiais como ferramenta para auxiliar na determinação da vida útil de pavimentos flexíveis (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). 2008.

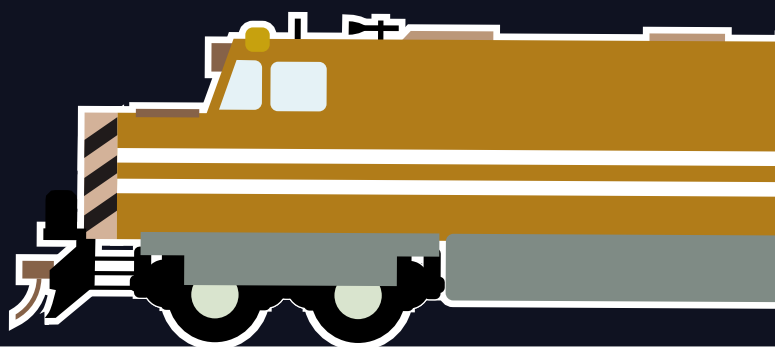


26° Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br



ABDER



**SUSTENTABILIDADE EM
MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO**

PROGRAMAÇÃO
TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS E ESTUDOS DE CASOS DE OBRAS
Terça-feira, 20 de agosto

SALA CAUEIRA		
SUSTENTABILIDADE EM MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO (ST04)		
⌚ 09:00	TT099	ASFALTO COM PLÁSTICO: UMA INICIATIVA PIONEIRA NO BRASIL NO CONTEXTO MUNDIAL
⌚ 09:20	TT204	ASFALTO COM PLÁSTICO A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA EXECUTADA NO BRASIL
⌚ 09:40	TT163	AVALIAÇÃO DO USO DE GARRAFAS PET COMO AGREGADO PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RODOVIAS
⌚ 10:20	EC842	ESTUDO DE CASO: UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA MANUTENÇÃO DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA NA MALHA DA 26ª UNIDADE REGIONAL DO DER/MG
⌚ 10:40	EC523	UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA SCHEELITA EM COMPOSIÇÕES ASFÁLTICAS
⌚ 11:00	TT974	REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA: CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE
⌚ 11:20	TT356	PRODUÇÃO DE PÓ DE VIDRO MOÍDO A PARTIR DE RESÍDUOS PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA



ASFALTO COM PLÁSTICO: UMA INICIATIVA PIONEIRA NO BRASIL NO CONTEXTO MUNDIAL

Assis Rodrigues Abbud Villela¹; Emerson Rodrigues Maciel²; Driely Mariane Lancarovici Alves³; Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques⁴; Robinson Alexandre de Avila⁵ & Larissa Montagner de Barros⁶

RESUMO

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental tem impulsionado a busca por soluções inovadoras para reduzir o impacto negativo dos resíduos plásticos no meio ambiente, a fim de mitigar o problema da disposição inadequada desses materiais. Esse conceito ganhou destaque em 2022 com a execução bem-sucedida do Trecho Experimental em Asfalto com Plástico, sendo a primeira experiência executada no Brasil. Tal tecnologia demonstra sua viabilidade técnica e o seu potencial para transformar resíduos plásticos em recursos valiosos na execução de pavimentação asfáltica. Este artigo apresenta uma análise sobre o Asfalto com Plástico, explorando desde os tipos de plásticos utilizados até as experiências internacionais e a aplicação prática dessa tecnologia pioneira no contexto brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE: Asfalto; Plástico; Logística Reversa; Economia Circular.

ABSTRACT

The growing concern for environmental sustainability has been driving the search for innovative solutions to reduce the negative impact of plastic waste on the environment in order to mitigate the problem of improper disposal of these materials. This concept gained prominence in 2022 with the successful execution of the Experimental Section in Plastic Asphalt, marking the first experience carried out in Brazil. Such technology demonstrates its technical feasibility and its potential to transform plastic waste into valuable resources in asphalt pavement construction. This article presents an analysis of plastic asphalt, exploring the types of plastics used, international experiences, and the practical application of this pioneering technology in the Brazilian context.

KEY WORDS: Asphalt; Plastic; Reverse Logistic; Circular Economy.

¹ Eixo-SP Concessionária de Rodovias,
² Stratura Asfaltos, Paulínia-SP, Brasil,
³ Eixo-SP Concessionária de Rodovias,
⁴ Eixo-SP Concessionária de Rodovias,
⁵ Eixo-SP Concessionária de Rodovias,
⁶ Stratura Asfaltos, Paulínia-SP, Brasil,

assis.villela@eixosp.com.br
emerson.maciel@stratura.com.br
driely.alves@eixosp.com.br
pedro.henriques@eixosp.com.br
robinson.avila@eixosp.com.br
larissa.montagner@stratura.com.br



INTRODUÇÃO

Este artigo se destaca por apresentar uma tecnologia inovadora dentro do contexto brasileiro, em comparação com iniciativas similares em âmbito internacional e por demonstrar seu compromisso com as diretrizes ESG (Ambiental, Social e de Governança), atendendo às exigências técnicas e gerando impactos positivos no meio ambiente e, conseqüentemente, na sociedade.

Segundo WIT, W. et al (2019), o Brasil é o quarto maior produtor de lixo no mundo, gerando anualmente 11.355.220 toneladas, das quais apenas 1,28% são reciclados. Essa situação coloca o País atrás somente dos Estados Unidos, China e Índia em termos de geração de resíduos. Contudo, uma abordagem inovadora, sustentável e pioneira no Brasil está se mostrando promissora na busca por soluções para esse desafio: a adoção de asfalto com plástico reciclado pós-consumo (PCR) na pavimentação asfáltica de rodovias.

A avaliação abrangente das emissões oriundas do processo de logística reversa do plástico reciclado pós-consumo (PCR) é crucial para entender o impacto ambiental total da adoção do asfalto com plástico. Estimativas das emissões devido ao transporte e manuseio do plástico PCR podem ser encontradas em estudos como o de TURNER et al. (2015), que quantificou o consumo médio de combustível por quilômetro para veículos de transporte de resíduos plásticos. Adicionalmente, o tratamento do plástico PCR envolve várias etapas, incluindo a limpeza, que pode utilizar água quente e produtos químicos diversos. Uma estimativa das emissões associadas a esses processos pode ser obtida em pesquisas como a de MARTÍN-LARA et al. (2022), que analisou os impactos ambientais associados ao consumo de eletricidade e aos produtos químicos utilizados na limpeza. As emissões decorrentes do corte e peletização do plástico PCR podem ser quantificadas com base em estudos como o da APR (2018), que, na fase de Avaliação de Ciclo de Vida (LCA), identificou e classificou as emissões dos processos de corte e peletização, fornecendo dados sobre o consumo de energia e as emissões associadas à conversão do material cortado em flocos limpos e em *pellets*. Além disso, outros aspectos devem ser considerados, como a incompatibilidade entre os plásticos reciclados e o ligante asfáltico, que pode levar à separação de fases. Essa situação exige a incorporação de compatibilizadores ou estabilizadores para melhorar a integração do plástico PCR ao asfalto. No entanto, é importante avaliar as emissões associadas a esses materiais para garantir que a utilização de polímeros compatibilizadores não aumente o impacto ambiental das misturas asfálticas (NCAT et al., 2021).

De acordo com dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2021), a malha rodoviária pavimentada do Brasil abrange uma extensão total de 213.500 quilômetros, correspondendo a aproximadamente 443.836,60 quilômetros de faixas pavimentadas. A implementação generalizada de polímeros reciclados pós-consumo em todas as rodovias pavimentadas do País ofereceria uma solução ecologicamente sustentável. Ao adotar essa inovação, mais de 80 bilhões de unidades de embalagens plásticas de alimentos seriam reaproveitadas.

Para a realização do Trecho Experimental no Brasil, foram necessárias aproximadamente 30 toneladas de asfalto com plástico reciclado, o que resultou na utilização de 450 kg de plástico reciclado. Essa quantidade de plástico corresponde a 200 mil unidades de embalagens plásticas de alimentos, representando uma significativa redução nos impactos ambientais. Essa abordagem sustentável resultou na



[DOI: 10.29327/1430212.49-70](https://doi.org/10.29327/1430212.49-70)

ASFALTO COM PLÁSTICO:
UMA INICIATIVA PIONEIRA NO BRASIL NO CONTEXTO MUNDIAL

diminuição de 900 kg de gases de efeito estufa, economizou 450 litros de petróleo, conservou 1.360 kW de energia elétrica e preservou 3.550 litros de água que, de outra forma, seriam utilizados no processo de produção de plástico virgem.

Em um cenário mais amplo, caso a tecnologia de Asfalto com Plástico fosse adotada nos 443.836,60 km de faixas pavimentadas no Brasil, haveria um potencial de redução de 13,32 mil toneladas de gases de efeito estufa, economia de 6,66 milhões de litros de petróleo, conservação de 20.064,73 MW de energia elétrica e preservação de 52,12 milhões de litros de água, que, de outra forma, seriam utilizados no processo de produção de plástico virgem.

Este artigo propõe uma iniciativa tecnológica em direção a um futuro mais sustentável e ambientalmente consciente, contribuindo para a adoção de soluções inovadoras e eficazes no enfrentamento da poluição plástica.

PLÁSTICOS

Os plásticos até o momento desempenham o papel de substituir outros materiais tradicionais (como: alumínio, gesso, madeira etc.) que se tornaram mais caros e ofereceram o desenvolvimento em diversas indústrias.

A história dos plásticos remonta a 1835, quando o monômero de cloreto de vinil foi apresentado por REGNAULT (MILAGRES, 2004).

A partir desse momento, a pesquisa sobre plásticos se expandiu, resultando em uma variedade de resinas termoplásticas, cada uma com estrutura química, processos de polimerização e catalisadores distintos.

Tipos de Plásticos

Os diferentes plásticos são divididos nos tipos a seguir descritos:

- **Polietileno Tereftalato (PET):** O PET é um plástico amplamente utilizado, especialmente em garrafas de refrigerante e garrafas de água. Ele é conhecido por sua transparência, durabilidade e capacidade de ser reciclado. Além das embalagens, o PET também é usado em fibras têxteis, como o poliéster.
- **Polietileno de Alta Densidade (PEAD):** O PEAD possui uma estrutura molecular de alta densidade e, portanto, é rígido. Ele é comumente utilizado em recipientes rígidos, como garrafas de produtos de limpeza, brinquedos, tubos de água, tanques de combustível, entre outros. Sua resistência e durabilidade o tornam adequado para aplicações onde é necessária uma maior rigidez e resistência à tração.
- **Policloreto de Vinila (PVC):** O policloreto de vinila é um plástico amplamente utilizado que é conhecido por sua durabilidade e resistência à corrosão. É comumente usado em tubos e conexões para sistemas de água e esgoto, revestimentos de fios elétricos, materiais de construção, como tubos de PVC e perfis, além de uma variedade de produtos de consumo, como sapatos, roupas e bolsas.



Assis Rodrigues Abbud Villela,
Emerson Rodrigues Maciel, Driely Mariane Lancarovici Alves,
Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques,
Robinson Alexandre de Avila & Larissa Montagner de Barros

- **Polietileno de Baixa Densidade (PEBD):** O polietileno é um dos plásticos mais comuns, e o polietileno de baixa densidade é uma de suas variações. É conhecido por sua flexibilidade e é frequentemente usado em sacolas plásticas, filmes de embalagem, revestimentos de cabos, entre outros. Sua baixa densidade resulta em uma estrutura mais flexível e menos rígida.
- **Polipropileno (PP):** O polipropileno é um plástico que é conhecido pela sua versatilidade e resistência. Ele é frequentemente usado em embalagens, recipientes, utensílios de cozinha, fibras têxteis, peças automotivas, entre outros. O PP é caracterizado por sua capacidade de suportar altas temperaturas e é resistente a produtos químicos.
- **Poliestireno (PS):** O poliestireno é outro plástico usado em uma variedade de aplicações. Ele pode ser encontrado em formas rígidas (como o poliestireno de alto impacto, HIPS) ou em formas expandidas, como o isopor. O PS é usado em copos descartáveis, caixas, embalagens de proteção, brinquedos entre outros produtos.

A Figura 1 a seguir apresenta o símbolo adotado para cada tipo de plástico existente.



Figura 1 – Símbolo adotado para cada tipo de plástico existente

RECICLAGEM DO PLÁSTICO

A reciclagem de plásticos é uma necessidade global onde o acúmulo de lixo e a escassez de recursos naturais impactam toda a sociedade.

A eficiência dessa prática não depende apenas da adequada coleta e seleção de resíduos, mas também da adoção de tecnologias que propiciem o uso de materiais do tipo PIR (Material Pós-Industrial), PCR (Reciclado Pós-Consumo) e o PCR- I (Reciclado Pós-Consumo Industrial).

Para a compreensão desses conceitos, o PIR se refere ao reaproveitamento de resíduos plásticos gerados durante o processo industrial, sem chegar, portanto, a ser consumido. Isso envolve transformar esses resíduos em produtos com desempenho análogo ao das resinas virgens, reduzindo, assim, o desperdício e a necessidade de matéria-prima virgem.



DOI: [10.29327/1430212.49-70](https://doi.org/10.29327/1430212.49-70)

ASFALTO COM PLÁSTICO: UMA INICIATIVA PIONEIRA NO BRASIL NO CONTEXTO MUNDIAL

O PCR diz respeito à reciclagem de plásticos provenientes do pós-consumo. Neste caso, esses materiais são descartados após o uso doméstico pelos consumidores e passam por processos de triagens e descontaminações.

Neste caso, os plásticos provenientes do pós-consumo podem ser designados como PCR-I, ou seja, aqueles resultantes do seu pós-consumo diretamente das indústrias, com um descarte adequado, não havendo necessidades de triagens ou descontaminações.

A inclusão dos plásticos do tipo PCR e PCR-I na reciclagem desempenha um papel crucial na redução do lixo e na promoção de uma economia circular e sustentável.

Existem três tipos principais de tecnologias de reciclagem de plásticos. A saber:

- A Reciclagem Primária (ou Pré-Consumo), que inclui materiais PIR, converte resíduos plásticos industriais em produtos com desempenho equivalente ao das resinas virgens. A Figura 2 ilustra o PIR (Material Pós-Industrial).



Figura 2 – PIR material Pós-Industrial

- A Reciclagem Secundária (ou Pós-Consumo) lida com plásticos descartados, exigindo uma separação adequada de outros materiais e pode incluir materiais do tipo PCR e PCR-I. As Figuras 3 e 4 exemplificam estes tipos de materiais, respectivamente.



Figura 3 – PIR material Pós-Industrial



Assis Rodrigues Abbud Villela,
Emerson Rodrigues Maciel, Driely Mariane Lancarovici Alves,
Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques,
Robinson Alexandre de Avila & Larissa Montagner de Barros



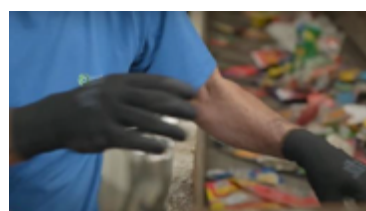
Figura 4 – PCR-I material Pós-Consumo Industrial

- A Reciclagem Terciária converte resíduos plásticos em produtos químicos e combustíveis, embora ainda não seja amplamente utilizada devido aos custos envolvidos.

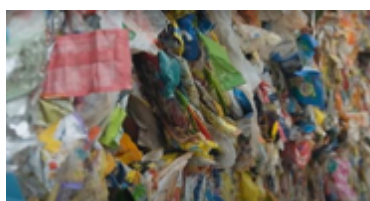
A seguir, apresenta-se a Figura 5 (abrangendo as etapas de “a” até “f”) que ilustra a sequência da produção dos grãos de plásticos reciclados (*pellets*) a partir da utilização de material Pós-Consumo de uso doméstico, na mistura asfáltica com plástico.



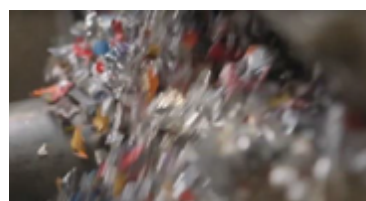
a) Resíduo heterogêneo em aterro sanitário



b) Triagem de resíduo



c) Armazenagem de plástico



d) Lavagem e picotamento de plástico



e) Extrusão da massa plástica



f) Formação dos grãos de plástico (*pellets*)

Figura 5 – Sequência da produção dos grãos de plásticos reciclados (*pellets*)



DOI: [10.29327/1430212.49-70](https://doi.org/10.29327/1430212.49-70)

ASFALTO COM PLÁSTICO:
UMA INICIATIVA PIONEIRA NO BRASIL NO CONTEXTO MUNDIAL

LOGÍSTICA REVERSA E ECONOMIA CIRCULAR

Logística Reversa

Na década de 80, a Logística Reversa se limitava ao transporte de bens entre consumidor e produtor em um canal de distribuição, representando essencialmente a inversão do fluxo primário que se deu do produtor para o consumidor.

No entanto, à medida que o conceito de Logística Reversa evoluiu ao longo do tempo, surgiram novas perspectivas e dimensões. Nos anos 90, foram introduzidas novas variáveis ao conceito, expandindo-o para além da simples devolução de produtos. Isso incluiu, entre diversas variáveis, a gestão do descarte de resíduos, a reutilização de materiais e o processo de reciclagem. A reintegração desses produtos pós-consumo no ciclo de produção passou a ser um fator agregador de valor.

Economia Circular

Ao longo da história, em especial a partir da Revolução Industrial, o processo produtivo foi predominantemente guiado pela lógica linear “extrair - produzir - utilizar - descartar”. Esse modelo linear de negócio realizado em diversas consequências indesejadas, incluindo o alto custo social do descarte de materiais e perda de energia, exploração insustentável de recursos naturais, poluição de ecossistemas e impactos climáticos globais (BERNDTSSON, 2015; PEREIRA et al., 2017).

A Economia Circular representa uma transformação de modelo, afastando-se daquele linear tradicional, que prioriza metas econômicas em detrimento das preocupações ambientais e sociais (SAUVÉ et al., 2016). Por sua vez, a abordagem circular alinha-se com o conceito de desenvolvimento sustentável, buscando maximizar os benefícios econômicos e sociais com o mínimo consumo de recursos e impacto ambiental (YING; LI-JUN, 2012).

Nesse sentido, a Logística Reversa se refere às práticas voltadas para o retorno dos materiais já utilizados ao ciclo produtivo, enquanto a Economia Circular é um modelo de economia que se contrapõe ao modelo linear (GOMES, 2021).

EXPERIÊNCIAS NA EXECUÇÃO DE ASFALTO COM PLÁSTICO

A utilização de resíduos de plástico na construção de rodovias é uma ideia relativamente nova e ainda não foram construídas estradas inteiramente a partir de plásticos. Entretanto, HUANG et al. (2007) sugeriram que os plásticos reciclados podem substituir agregados (via seca) ou servir como modificador de ligante (via úmida).

Estudos de desempenho laboratorial e de campo relatam que o uso de resíduos plásticos em misturas betuminosas aumenta a durabilidade e resulta em maior resistência à deformação e dano por umidade induzida e contribui para uma vida útil mais longa (BALE, 2011; BEHL et al., 2012; BHOOT et al., 2012; SOJOBI et al., 2016; KHURSHEED e SINGH, 2017; MANJU et al., 2017).



Assis Rodrigues Abbud Villela,
Emerson Rodrigues Maciel, Driely Mariane Lancarovici Alves,
Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques,
Robinson Alexandre de Avila & Larissa Montagner de Barros

Alguns países que têm avançado no uso do Asfalto com Plástico reciclado. Resumidamente, o uso de resíduos plásticos na execução de rodovias realizados nos principais países encontra-se a seguir descrito.

EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS

Índia

O sul da Ásia por ser a região líder mundial em despejo a céu aberto de resíduos, com 334 milhões de toneladas por ano, das quais 40 milhões são de plástico.

Desde 2002, a Índia construiu mais de 2.500 km de estradas com esta tecnologia que tiveram bom desempenho funcional e estrutural por mais de 10 anos. (VASUDEVAN et al., 2010; GOVERNMENT OF INDIA, 2015; NATIONAL RURAL ROADS DEVELOPMENT AGENCY, 2019; PATIL et al. 2023).

Reino Unido

O asfalto com resíduos plásticos reciclados foi executado em Durham em um trecho da rodovia A689, nas proximidades de SEDGEFIELD e na pista de pouso e decolagem e também de taxiamento do Aeroporto de Carlisle (WHITE e REID, 2017; WHITE e REID, 2018; WHITE, 2019).

Estados Unidos e Austrália

A mesma tecnologia adotada no Reino Unido, foi adotada em rodovias no Estados Unidos e na Austrália (UCSD GUARDIAN, 2018).

Holanda

Na Holanda, a tecnologia desenvolvida foi para blocos pré-fabricados, modulares e ocas fabricados em o plástico reciclado e implantada em ciclovias nos municípios de Zwolle e de Steenwijkerland, na Holanda. Atualmente, esta tecnologia está sendo aprimorada para o para sua aplicação em rodovias (PLASTICROAD, 2019).

Experiencia Nacional

O Trecho Experimental de Asfalto com Plástico, localizado na rodovia Washington Luís (SP-310) no município de Rio Claro, constitui uma iniciativa inovadora para abordar os desafios ambientais e de pavimentação rodoviária. Este projeto pioneiro, realizado em agosto de 2022, utilizou uma mistura de ligante asfáltico (CAP 30/45) modificado com plásticos reciclados pós-consumo (PCR).

Os materiais foram processados em uma usina volumétrica, utilizando secagem por contrafluxo e um misturador do tipo *pug-mill*. O controle tecnológico garantiu a conformidade dos ligantes com as especificações necessárias para garantir durabilidade e resistência. A mistura asfáltica resultante apresentou uma distribuição granulométrica contínua e foi projetada para atender aos parâmetros volumétricos pré-definidos.



DOI: [10.29327/1430212.49-70](https://doi.org/10.29327/1430212.49-70)

**ASFALTO COM PLÁSTICO:
UMA INICIATIVA PIONEIRA NO BRASIL NO CONTEXTO MUNDIAL**

A execução do Trecho Experimental envolveu a fresagem das camadas asfálticas existentes, seguida pela aplicação da nova mistura de Asfalto com Plástico. O desempenho estrutural foi avaliado por meio de levantamentos deflectométricos, que demonstraram deflexões abaixo dos limites admissíveis. Além disso, a superfície do pavimento apresentou uma melhoria significativa, com a eliminação de defeitos observados no pavimento primitivo (anterior à execução do Asfalto com Plástico).

Outras análises, incluindo a avaliação do Índice de Gravidade Global (IGG) e a medição da irregularidade da superfície, confirmaram os benefícios do Asfalto com Plástico em termos de durabilidade e conforto para os usuários da rodovia. Os resultados destacam a viabilidade técnica dessa tecnologia pioneira no Brasil e seu potencial para promover uma infraestrutura rodoviária mais sustentável e de alto desempenho.

A inovação do Asfalto com Plástico e o seu pioneirismo no Brasil oferece uma alternativa eficaz para reduzir a poluição plástica, promover a economia circular e criar oportunidades de emprego e renda. Além disso, demonstra o compromisso com a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental, alinhando-se com os princípios de governança socioambiental.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho destaca o papel crucial e inovador do Asfalto com Plástico na busca por soluções sustentáveis para a pavimentação de rodovias, tanto no contexto brasileiro, quanto no cenário mundial. A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e a urgente necessidade de reduzir o impacto negativo dos resíduos plásticos no meio ambiente têm impulsionado a adoção de tecnologias inovadoras, como o Asfalto com Plástico, como uma alternativa viável e eficaz.

A análise das experiências internacionais revela que o uso de resíduos plásticos na execução de pavimentos asfálticos tem sido implementado com sucesso em diversos países, incluindo Índia, Reino Unido, Estados Unidos, Austrália e Holanda. Essas experiências demonstram os benefícios técnico-econômicos e ambientais dessa tecnologia, incluindo maior durabilidade, desempenho e redução da poluição plástica.

No contexto nacional, o Trecho Experimental de Asfalto com Plástico realizado na rodovia Washington Luís (SP-310) representa um marco significativo na adoção dessa tecnologia pioneira no Brasil. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica do Asfalto com Plástico e seu potencial para promover uma infraestrutura rodoviária nacional mais sustentável e de alto desempenho.

Ao utilizar uma mistura de ligante asfáltico com plásticos reciclados pós-consumo (PCR), o Trecho Experimental alcançou resultados promissores em termos de durabilidade, resistência e conforto para os usuários da rodovia. Além disso, a eliminação de defeitos observados no pavimento primitivo e a melhoria significativa na superfície do pavimento destacam os benefícios do Asfalto com Plástico.

A iniciativa pioneira do Brasil no desenvolvimento e execução do Asfalto com Plástico reflete o compromisso com a sustentabilidade ambiental, a economia circular e a responsabilidade socioambiental. Ao adotar essa tecnologia inovadora, o Brasil se insere no âmbito das iniciativas globais de Asfalto com



Assis Rodrigues Abbud Villela,
Emerson Rodrigues Maciel, Driely Mariane Lancarovici Alves,
Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques,
Robinson Alexandre de Avila & Larissa Montagner de Barros

Plástico, contribuindo para a redução da poluição plástica e a promoção de uma economia mais sustentável e consciente.

Nesse sentido, o Asfalto com Plástico representa uma solução promissora e eficaz para os desafios ambientais e de pavimentação rodoviária enfrentados pelo Brasil e pelo mundo. Com base nas experiências internacionais e nos resultados do Trecho Experimental no Brasil, é evidente que essa tecnologia possui um potencial significativo para transformar resíduos plásticos em recursos valiosos e promover uma infraestrutura rodoviária mais sustentável e resiliente.

A iniciativa pioneira do Brasil no desenvolvimento e execução do Asfalto com Plástico reflete um compromisso com a sustentabilidade ambiental, a economia circular e a responsabilidade socioambiental. Ao adotar essa tecnologia inovadora, o Brasil se insere no âmbito das iniciativas globais de Asfalto com Plástico, contribuindo para a redução da poluição plástica e a promoção de uma economia mais sustentável e consciente.

Nesse sentido, a integração do Asfalto com Plástico na infraestrutura rodoviária representa um passo significativo na direção de abordar os desafios ambientais e da pavimentação rodoviária no cenário nacional e internacional. Esta abordagem beneficia a Logística Reversa, ao incentivar a coleta seletiva e a participação de cooperativas de reciclagem, e ainda contribui para a Economia Circular, ao reduzir a poluição ambiental e a quantidade de resíduos plásticos.

Ao reintegrar materiais descartados na cadeia produtiva, o Asfalto com Plástico promove a otimização dos recursos, transformando resíduos plásticos em valiosos componentes para a execução de pavimentos asfálticos sustentáveis e resilientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APR. The Association of Plastic Recyclers. Life Cycle Impacts for Post-Consumer Recycled Resins: PET, HDPE, and PP, 49pp. 2018.

BALE, A.S. Potential reuse of plastic waste in road construction: a review. International Journal of Advances in Engineering & Technology (IJAET) 2: 233-236. 2011.

BEHL, A., JAIN, P.; SHARMA G. Study on waste polyvinyl chloride modified bitumen for paving applications. ARRB Conference, 25th, 2012, Perth, Western Australia, Australia. 2012.

BERNDTSSON, M. Circular Economy and Sustainable Development. 2015. Master thesis in Sustainable Development. Department of Earth Sciences.

BHOOT, K.; MALVIYA K.; PRAJAPAT T.K.. Potential reuse of plastic waste in road construction: A review. International Journal of Scientific Research in Engineering 1(9): 1-5. 2012.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. Anuário CNT do Transporte. 2021. Disponível em:



DOI: [10.29327/1430212.49-70](https://doi.org/10.29327/1430212.49-70)

ASFALTO COM PLÁSTICO:
UMA INICIATIVA PIONEIRA NO BRASIL NO CONTEXTO MUNDIAL

<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/Pesquisa_CNT_Rodovias_2021_Web.pdf>. Acesso em 23 de julho de 2022.

GOMES, R. R. Relação entre Economia Circular e Logística Reversa: uma Revisão Sistemática. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). Faculdade de Administração. Universidade Federal de Santa Catarina. 27 p. 2021.

Government of India. Use of plastic waste in bituminous mixes in construction of National Highways. M.o.R.T. Highway, Ministry of Road Transport & Highway. 2015.

HUANG, Y.; BIRD, R.N.; HEIDRICH, O. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling* 52(1): 58-73. 2007.

KHURSHEED, T.; SINGH, B.K. Road construction from solid waste in Jaipur. *International Journal For Technological Research In Engineering*: 1711-1714. 2017.

MANJU, R.; SATHYA S.; SHEEMA K. Use of plastic waste in bituminous pavement. *Int J ChemTech Res* 10(08): 804-811. 2017.

MARTÍN-LARA M., MORENO J., GARCIA-GARCIA G., ARJANDAS S., CALERO M. Life cycle assessment of mechanical recycling of post-consumer polyethylene flexible films based on a real case in Spain. *Journal of Cleaner Production*. 2022.

MILAGRES, E. G. Compósitos de Partícula de Madeira de Eucaliptus Grandis, Polipropileno. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal / Universidade Federal de Viçosa., Viçosa, 73p.

NATIONAL RURAL ROADS DEVELOPMENT AGENCY. Guidelines for the use of Plastic Waste in Rural Roads Construction, Ministry of Rural Development, Government of India. 2019.

NCAT, WRI; GHK; Dow Chemical. Performance Properties of Laboratory Produced Recycled Plastic Modified (RPM) Asphalt Binders and Mixtures, NCHRP Project 9-66 Interim Report, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Transportation Research Board, Washington, D.C., 244pp. 2021.

PATIL, P.; STANKEVICH, N.; TSYDENOVA, N.; DIANA, Z. 'Plastic roads' made from waste: A path worth paving for South Asia? 2023. Disponível em: <<https://blogs.worldbank.org/endpovertyinsouthasia/plastic-roads-made-waste-path-worth-paving-south-asia>> Acessado em: 27 de outubro de 2023.

PEREIRA, F. S.; MONCUNILL, M. F.; MONTEIRO, S. A. T. Projetos alinhados com os preceitos da Economia Circular. *Economia Circular Holanda Brasil - Da Teoria a Prática*. Consulado Geral dos Países baixos no Rio de Janeiro. 2017.



Assis Rodrigues Abbud Villela,
Emerson Rodrigues Maciel, Driely Mariane Lancarovi Alves,
Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques,
Robinson Alexandre de Avila & Larissa Montagner de Barros

PLASTICROAD. Uma Revolução na Construção de Estradas. 2019. Disponível em: <<https://www.plasticroad.eu/en/>> Acessado em: 27 de outubro de 2023.

SAUVÉ, S.; BERNARD, S.; SLOAN, P. Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*, v. 17, p. 48–56, 2016.

SOJOBI, A.O.; NWOBODO S.E.; ALADEGBOYE O.J. Recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle wastes in bituminous asphaltic concrete. 2016.

TURNER, D. A.; WILLIAMS, I. D.; KEMP, S. "Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials." *Resources, Conservation and Recycling*. 2015.

UCSD Guardian. First Road in U.S. Made With Recycled Plastic Paved on Campus. 2018. Disponível em: <<http://ucsdguardian.org/2018/11/04/first-road-u-s-maderecycled-plastic-paved-campus/>> Acessado em: 27 de outubro de 2023.

VASUDEVAN, R.N.S.K.; VELKENNEDY, R.; SEKAR, A.R.C.; SUNDARAKANNAN, B. Utilization of waste polymers for flexible pavement and easy disposal of waste polymers. *International Journal of Pavement Research and Technology*: 34-42. 2010.

WHITE, G.; REID, G. Recycled waste plastic for extending and modifying asphalt binders. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324908837_RECYCLED_WASTE_PLASTIC_FOR_EXTENDING_AND_MODIFYING ASPHALT_BINDERS>. Acessado em: 27 de outubro de 2023.

WHITE, G.; REID, G. Recycled waste plastic for extending and modifying asphalt binders. *Symposium on Pavement Surface Characteristics (SURF)*, 8th, 2018, Brisbane, Queensland, Australia. 2018.

WHITE, G. Evaluating recycled waste plastic modification and extension of bituminous binder for asphalt. *Eighteenth Annual International Conference on Pavement Engineering, Asphalt Technology and Infrastructure*, Liverpool, England, United Kingdom. 2019.

WIT, W. et al. *Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização*. Gland: WWF, 2019. 50p.

YING, J.; LI-JUN, Z. Study on Green Supply Chain Management Based on Circular Economy 2012. *Physics Procedia* 25, 1682 – 1688



ASFALTO COM PLÁSTICO A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA EXECUTADA NO BRASIL

Assis Rodrigues Abbud Villela¹; Emerson Rodrigues Maciel²; Driely Mariane Lancarovici Alves³; Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques⁴; Robinson Alexandre de Avila⁵ & Larissa Montagner de Barros⁶

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados do desempenho do Trecho Experimental, pioneiro no Brasil, que utiliza Asfalto com Plástico. Localizado na rodovia Washington Luís (SP-310), no município de Rio Claro, este trecho abrange os quilômetros 170,830 a 171,650 no sentido Norte. O experimento compreende quatro seções, cada uma com uma composição específica de Asfalto com Plástico, empregando ligante CAP 30/45 e plásticos reciclados pós-consumo (PCR). Após a remoção das camadas asfálticas anteriores, foi aplicado o Asfalto com Plástico, seguido por análises de desempenho estrutural e funcional ao longo dos dois anos desde sua implantação. Os valores defletoométricos demonstraram-se abaixo da deflexão admissível, evidenciando a resistência e a durabilidade do pavimento. Além disso, a avaliação do Índice de Gravidade Global (IGG) revelou uma significativa melhoria na condição da superfície do pavimento, eliminando defeitos previamente observados. A aplicação deste tipo de asfalto resultou em reduções consideráveis na irregularidade da superfície da rodovia e no afundamento da trilha de roda, proporcionando maior conforto e segurança aos usuários. Esta inovação tecnológica representa uma alternativa sustentável para a pavimentação de rodovias, contribuindo para a redução da poluição plástica e para o desenvolvimento socioeconômico, ao mesmo tempo que promove a sustentabilidade ambiental e a responsabilidade social.

PALAVRAS-CHAVE: Asfalto; Plástico; Trecho Experimental; Desempenho.

ABSTRACT

This article presents the performance results of the Experimental Section, pioneering in Brazil, which utilizes Plastic Asphalt. Located on the Washington Luís highway (SP-310), in the municipality of Rio Claro, this section covers kilometers 170.830 to 171.650 in the North direction. The experiment comprises four sections, each with a specific composition of Plastic Asphalt, employing binder CAP 30/45 and post-consumer recycled plastics (PCR). After the removal of the previous asphalt layers, Plastic Asphalt was applied, followed by structural and functional performance analyses over the two years since its implementation. The deflectionometric values were found to be below the admissible deflection, highlighting the pavement's strength and durability. Additionally, the evaluation of the Global Severity Index (IGG) revealed a significant improvement in the pavement surface condition, eliminating previously observed defects. The application of this type of asphalt resulted in considerable reductions in road surface irregularity and wheel track rutting, providing greater comfort and safety to users. This technological innovation represents a sustainable alternative for road paving, contributing to the reduction of plastic pollution and socioeconomic development, while promoting environmental sustainability and social responsibility.

KEY WORDS: Asphalt; Plastic; Trial Section; Performance.

¹ Eixo-SP Concessionária de Rodovias,
² Stratura Asfaltos, Paulínia-SP, Brasil,
³ Eixo-SP Concessionária de Rodovias,
⁴ Eixo-SP Concessionária de Rodovias,
⁵ Eixo-SP Concessionária de Rodovias,
⁶ Stratura Asfaltos, Paulínia-SP, Brasil,

assis.villela@eixosp.com.br
emerson.maciel@stratura.com.br
driely.alves@eixosp.com.br
pedro.henriques@eixosp.com.br
robinson.avila@eixosp.com.br
larissa.montagner@stratura.com.br



INTRODUÇÃO

A utilização de materiais inovadores e sustentáveis na execução de pavimentos asfálticos tem se tornado uma necessidade crescente, no Brasil e no mundo. Nesse contexto, o asfalto com incorporação de plástico reciclado pós-consumo (PCR) surge como uma alternativa promissora, oferecendo benefícios ambientais e demonstrando melhorias estruturais e funcionais nas vias.

O trecho experimental descrito neste estudo, localizado na rodovia Washington Luís (SP-310), representa um marco significativo na introdução de uma solução pioneira no Brasil e a avaliação de desempenho dessa tecnologia. Compreendendo quatro seções experimentais, cada uma com diferentes composições e espessuras de Asfalto com Plástico, o estudo visa avaliar a viabilidade técnica dessa solução, além de analisar seu desempenho estrutural e funcional ao longo do tempo.

O Asfalto com Plástico busca oferecer uma solução sustentável para a gestão de resíduos plásticos, garantindo maior durabilidade, resistência e segurança nas estradas. As análises estruturais e funcionais realizadas demonstram resultados promissores, com melhorias significativas na condição da superfície do pavimento e redução dos defeitos observados no pavimento primitivo.

Nesse sentido, este estudo destaca os avanços tecnológicos na área da pavimentação asfáltica, ressaltando a importância de adotar práticas sustentáveis e inovadoras para enfrentar desafios ambientais e sociais.

Ao fornecer uma alternativa de pavimentação de alto desempenho com relevância ambiental e social, o Asfalto com Plástico surge como uma alternativa de infraestrutura rodoviária mais sustentável e responsável, contribuindo para a economia circular, a redução da poluição plástica e o desenvolvimento socioeconômico.

TRECHO EXPERIMENTAL

Localização

O trecho experimental está situado na rodovia Washington Luís (SP-310), abrangendo os quilômetros 170,830 a 171,650 no sentido Norte, no município de Rio Claro. Nessa área, a direção Norte da rodovia Washington Luís possui três faixas de tráfego no sentido Norte (em direção a São Carlos), e o Trecho Experimental foi implementado na terceira faixa, mais à direita (faixa mais exigida).

Durante o ano de 2021, o Trecho Experimental registrou uma média diária de 6.000 veículos comerciais.

O Trecho Experimental compreende quatro Seções, descritas a seguir:

- Primeira Seção Experimental (SE-01): seção de 7cm de Asfalto com Plástico;
- Segunda Seção Experimental (SE-02): seção de 6cm de Asfalto com Plástico;
- Terceira Seção Experimental (SE-03): seção de 4cm de Asfalto com Plástico;
- Quarta Seção Experimental (SE-04): seção de 6cm de Asfalto com Plástico.



DOI: 10.29327/1430212.49-71

ASFALTO COM PLÁSTICO A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA EXECUTADA NO BRASIL

A Tabela 1 e a Figura 1 que seguem fornecem informações sobre a localização e a composição das camadas em cada Seção do Trecho Experimental.

Tabela 1 - Constituição geral do trecho experimental

Seção Experimental	km		Extensão (m)	Largura (m)	Espessura (cm)
	Inicial	Final			
SE-01	170,83	171,05	220	3,6	7
SE-02	171,05	171,27	220	3,6	6
SE-03	171,27	171,35	80	3,6	4
SE-04	171,35	171,65	300	3,6	6

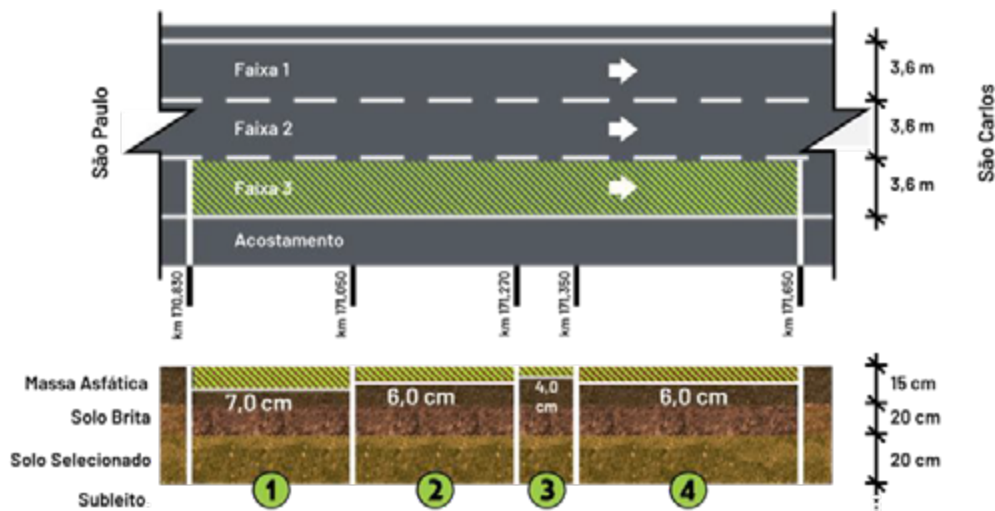


Figura 1 – Estruturas das Seções Experimentais

MATERIAIS

O ligante utilizado no material asfáltico foi o CAP 30/45, e plásticos reciclados pós-consumo doméstico do tipo PCR. Este ligante é caracterizado por apresentar menor suscetibilidade térmica, melhor adesão e coesão entre os agregados, maior resistência à oxidação e um ponto de amolecimento mais elevado, resultando em maior durabilidade, resistência a trincas e deformações permanentes em diversas condições climáticas.

Os agregados utilizados, assim como o processo de usinagem Asfalto com Plástico, foram fornecidos por uma Usina de Asfaltos localizada a cerca de 15 km do Trecho Experimental. Essa Usina é do tipo volumétrica, equipada com um sistema de secagem por contrafluxo e um misturador do tipo *pug-mill*.

A Figura 2 a seguir ilustra o processo de usinagem Asfalto com Plástico.



Assis Rodrigues Abbud Villela,
Emerson Rodrigues Maciel, Driely Mariane Lancarovici Alves,
Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques,
Robinson Alexandre de Avila & Larissa Montagner de Barros



Figura 2 – Processo de fabricação da mistura de Asfalto com Plástico

Conforme as informações do controle tecnológico no recebimento do ligante na Usina, as características estão detalhadas na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Caracterização do ligante asfáltico com plástico

Parâmetro	Unidade	CAP 30/45 (*)	PCR	Método
Penetração	dmm	30	22	NBR-6576/2007
Ponto de amolecimento	°C	52,5	66,7	NBR-6560/2016
Recuperação Elástica	%	8,1	73,5	DNIT 130/2010 - ME
Viscosidade Brookfield, 135°C (20 rpm)	cP	435	2.275	NBR-15184/2004
Viscosidade Brookfield, 150°C (50 rpm)	cP	219	969	
Viscosidade Brookfield, 177°C (100 rpm)	cP	78	305	
Separação de Fases	-	0,11	11,00	

(*) Valores de referência para CAP convencional 30/45 ensaiado

Observa-se que a adição de plástico resultou em um considerável aumento no ponto de amolecimento, bem como uma redução na penetração. Além disso, houve um aumento notável nas três viscosidades. No entanto, ao analisar o ensaio de separação de fases – isto é, a condição na qual o material não mantém estabilidade durante o armazenamento em um tanque com sistema de aquecimento – observou-se que este plástico apresentou baixa afinidade química com o meio intermicelar, acarretando uma separação acima do valor desejado (superior a 10,00), a qual foi corrigida ao ligar o agitador do tanque de produção piloto, resultando na completa homogeneização dos ligantes.



DOI: 10.29327/1430212.49-71

ASFALTO COM PLÁSTICO A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA EXECUTADA NO BRASIL

Distribuição Granulométrica

Neste estudo, o agregado mineral utilizado foi obtido a partir da britagem de basalto, proveniente de uma Pedreira localizada no município de Campinas/SP. O ligante asfáltico de penetração 30/45 foi modificado pela adição de plástico PCR.

Para o estudo, foi considerada a dosagem da mistura asfáltica incluindo frações de agregados minerais compostas por 33% de Brita 1/2", Pedrisco e Pó de pedra, juntamente com 1% de cal, e o teor de CAP modificado com plástico PCR correspondente a 5,0%, para um volume de vazios de 4%, conforme especificação da Faixa-III do DER/SP. A representação gráfica da distribuição granulométrica está apresentada na Figura 3 a seguir.

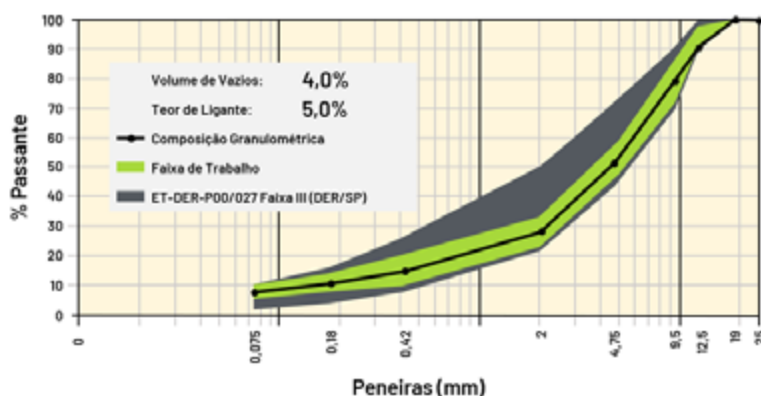


Figura 3 – Distribuição granulométrica da Mistura Asfáltica com Plástico

PROJETO DA MISTURA DO ASFALTO COM PLÁSTICO

Com base na distribuição granulométrica escolhida, procedeu-se ao projeto da mistura entre o asfalto e o plástico. Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros volumétricos identificados.

Tabela 3 - Parâmetros volumétricos do Asfalto com Plástico

Parâmetro	Unidade	Faixa III (DER/SP, 2005)	PCR
Teor de Asfalto	%	–	5,0
Massa específica aparente	(g/cm ³)	–	2,551
Massa específica teórica.	(g/cm ³)	–	2,656
V _v	%	4,0	4,0
V.A.M.	%	> 14,0	16,7
R.B.V.	%	65 a 80	76,3
Relação fíler/asfalto	MPa	0,6 a 1,2	1,6
Estabilidade	kN	> 8,0	18,6
Fluência	0,01 pol	8 a 16	13,7
Tração Compressão Diametral	MPa	> 0,80	2,83

(*) Valores de referência para especificação da Faixa-III do DER/SP



Assis Rodrigues Abbud Villela,
Emerson Rodrigues Maciel, Driely Mariane Lancarovici Alves,
Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques,
Robinson Alexandre de Avila & Larissa Montagner de Barros

De acordo com a volumetria da mistura asfáltica analisada, observou-se que apenas a relação fíler/asfalto não se adequou aos parâmetros recomendados pela especificação do DER/SP. Quanto ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, conduzido conforme as diretrizes do DNIT 136/2018 ME, foi possível constatar que o Asfalto com Plástico demonstrou uma elevada resistência.

EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL

Procedimento de Remoção das Camadas Asfálticas

Nas quatro Seções Experimentais (SE-01, SE-02, SE-03 e SE-04), procedeu-se a remoção das camadas asfálticas nas espessuras definidas conforme apresentado na Tabela 4 a seguir. Essas remoções foram realizadas por meio de fresagem.

Tabela 4 – Espessura de fresagem no trecho experimental

Seção Experimental	km		Extensão (m)	Espessura de Fresagem (cm)
	Inicial	Final		
SE-01	170,83	171,05	220	7
SE-02	171,05	171,27	220	6
SE-03	171,27	171,35	80	4
SE-04	171,35	171,65	300	6

Inicialmente, a Seção Experimental SE-03 estava planejada para ter uma extensão de 220 m. Contudo, durante a fresagem de 4 cm de espessura, foi observado que a superfície da caixa fresada apresentava instabilidade, com materiais asfálticos soltos em placas. Diante dessa situação, foi realizada uma fresagem adicional de 2 cm de espessura para eliminar as áreas com materiais soltos. Assim, foi criada uma nova Seção Experimental, SE-04, com uma superfície de caixa totalmente íntegra, adequada para a recomposição da massa asfáltica.

Execução da Camada de Asfalto com Plástico

Logo após a fresagem de cada Seção Experimental, realizou-se a aplicação da pintura de ligação, seguida da aplicação da camada de Asfalto com Plástico para restabelecer as caixas fresadas.

A temperatura de compactação variou de 160 a 175°C, e, em todas as Seções Experimentais, a massa asfáltica foi aplicada em uma única camada. A seguir, as Figuras 10 e 11 ilustram a recomposição das caixas fresadas com Asfalto com Plástico.



DOI: 10.29327/1430212.49-71

ASFALTO COM PLÁSTICO A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA EXECUTADA NO BRASIL

ANÁLISES ESTRUTURAIS E FUNCIONAIS

Análises Estruturais

As análises estruturais no Trecho Experimental foram realizadas por meio de medições deflectométricas utilizando o equipamento FWD (*Falling Weight Deflectometer*).

A Tabela 5 e a Figura 4 a seguir exibem os registros deflectométricos obtidos.

Tabela 5 – Levantamentos deflectométricos do trecho experimental

Seção	km		Extensão (m)	Deflexão Máxima (10^{-2} mm)			
	Inicial	Final		Pav.Primitivo 28/07/2022	Pavimento Novo		
Experimental					03/08/2022	10/11/2022	13/03/2023
SE-01	170,83	171,05	220	26	25	20	20
SE-02	171,05	171,27	220	20	18	21	22
SE-03	171,27	171,35	80	20	25	22	26
SE-04	171,35	171,65	300	21	18	21	21

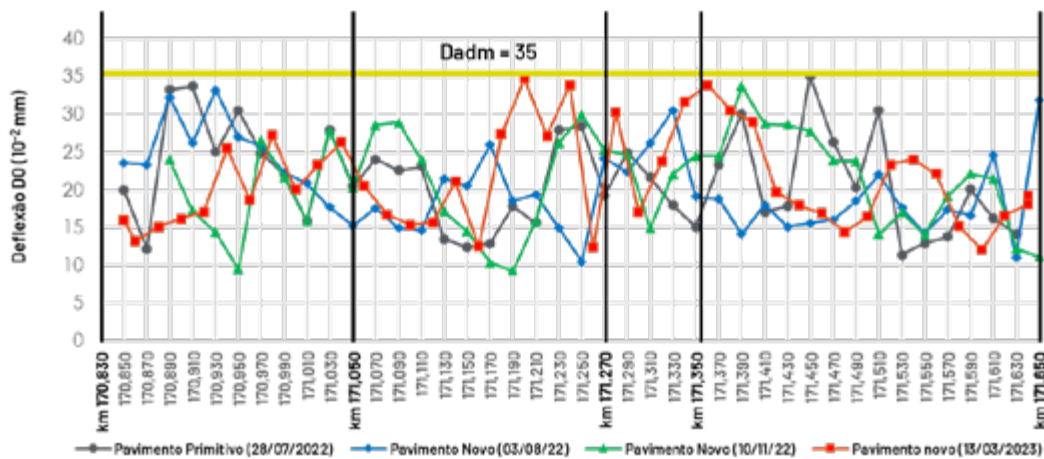


Figura 4 – Levantamentos deflectométricos do trecho experimental

A deflexão admissível é de 35×10^{-2} mm. Verifica-se que todos os valores deflectométricos estão abaixo da deflexão admissível para o trecho da rodovia.

Análises Funcionais

Avaliação do Índice de Gravidade Global (IGG)

Para avaliar a degradação da superfície do pavimento, foi elaborado o mapeamento dos defeitos em toda a superfície do Trecho Experimental, conforme apresentado na Tabela 6 a seguir. Esse processo seguiu as terminologias de defeitos de pavimento estabelecidas pela norma DNIT 005/2003 TER,



Assis Rodrigues Abbud Villela,
Emerson Rodrigues Maciel, Driely Mariane Lancarovici Alves,
Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques,
Robinson Alexandre de Avila & Larissa Montagner de Barros

além da aplicação do Índice de Gravidade Global (IGG), conforme recomendado na norma DNIT 006/2003 PRO.

Tabela 6 – Levantamentos de IGG do trecho experimental

Seção	km		Extensão (m)	IGG			
	Inicial	Final		Pav.Primitivo 28/07/2022	Pavimento Novo		
					03/08/2022	10/11/2022	13/03/2023
SE-01	170,83	171,05	220	31	0	0	0
SE-02	171,05	171,27	220	31	0	0	0
SE-03	171,27	171,35	80	31	0	0	0
SE-04	171,35	171,65	300	31	0	0	0

A Tabela 6 revela que o Pavimento Primitivo exibiu algum tipo de defeito. Apesar do valor de IGG corresponder a 23, a Figura 5 a seguir indica que, naquela época, o pavimento apresentava alguns defeitos significativos para a rodovia Washington Luís (SP-310), tais como trincamentos do tipo FC-3. Entretanto, nos levantamentos subsequentes, após a aplicação do Asfalto com Plástico, não foram mais identificados quaisquer tipos de defeitos.



Figura 5 – Trincamentos do tipo FC-3

Avaliação da Irregularidade

Apesar de representar uma pequena fração, as irregularidades no Trecho Experimental foram registradas a cada 20 metros. A Figura 6 a seguir evidencia que, no levantamento de 27/07/2022, referente ao Pavimento Primitivo, dois pontos apresentaram irregularidades pronunciadas, alcançando valores de 3,30 m/km e 3,33 m/km, superiores ao limite contratual de 2,69 m/km. Nos levantamentos subsequentes, em 03/08/2022 e 08/11/2022, observou-se um ponto com irregularidade acima do limite admissível. No entanto, no levantamento de 06/02/2023, todos os pontos do Trecho Experimental exibiram irregularidades inferiores a 2,69 m/km.



DOI: 10.29327/1430212.49-71

ASFALTO COM PLÁSTICO A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA EXECUTADA NO BRASIL

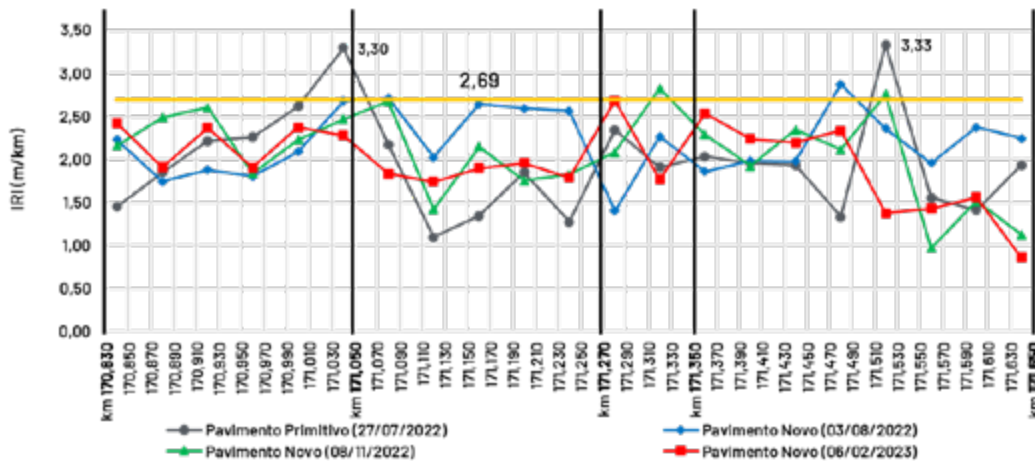


Figura 6 – Levantamentos de Irregularidade

Essas reduções sugerem que as intervenções, incluindo a aplicação de Asfalto com Plástico, contribuíram para a estabilização e aprimoramento do trecho ao longo do tempo.

Avaliação da Afundamento de Trilha de Roda

Na Figura 7, nota-se que todos os levantamentos efetuados com o Asfalto com Plástico apresentam afundamentos de trilha de roda inferiores a 7 mm. Em contrapartida, no primeiro levantamento realizado na camada asfáltica anterior, composta por material convencional, foram identificados pontos com valores iguais ou superiores a 7 mm.

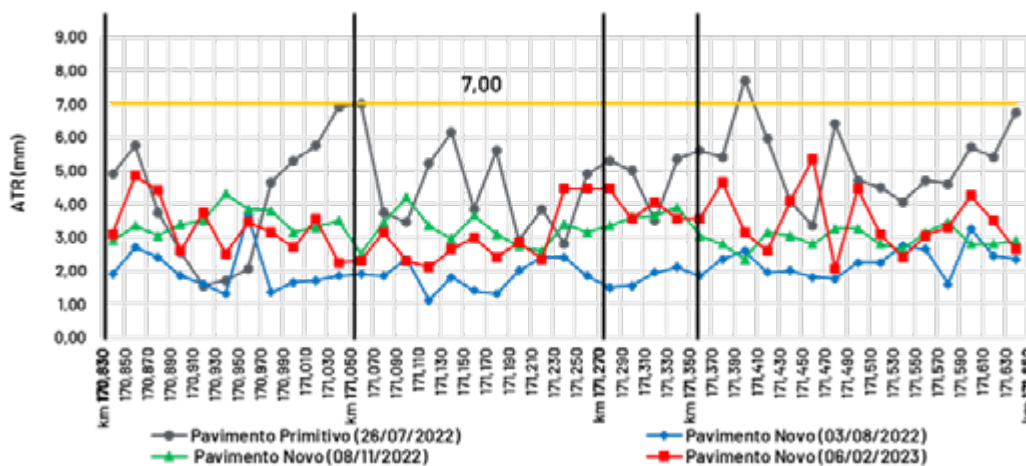


Figura 7 – Levantamentos do Afundamento de Trilha de Roda

A Figura 8 exemplifica afundamento de trilha roda encontrado no Trecho Experimental no pavimento primitivo, antes da execução do Asfalto com Plástico.



Assis Rodrigues Abbud Villela,
Emerson Rodrigues Maciel, Driely Mariane Lancarovi Alves,
Pedro Francisco Hernani Santiago Henriques,
Robinson Alexandre de Avila & Larissa Montagner de Barros



Figura 8 – Afundamento de trilha de roda

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado representa um avanço significativo no contexto das rodovias brasileiras, introduzindo uma tecnologia inovadora que demonstra um forte compromisso com as diretrizes ESG (Ambiental, Social e Governança) e oferece benefícios ambientais e sociais substanciais.

Destaca-se a incorporação de plásticos reciclados pós-consumo (PCR) provenientes de embalagens de alimentos descartadas no lixo doméstico no ligante asfáltico, uma solução ambientalmente sustentável que contribui para a redução dos impactos ambientais em um cenário de alta geração de resíduos no Brasil.

Embora os dados volumétricos das misturas apresentarem resultados satisfatórios, a relação pó/asfalto não foi possível enquadrar dentro dos limites especificados. No entanto, essa condição particular não afetou o desempenho do Asfalto com Plástico após a sua aplicação. O maior valor para a resistência à tração foi encontrado no Asfalto com Plástico, quando comparado com a mistura asfáltica convencional (CAP 30/45). Esse resultado era esperado, já que estes ligantes modificados com plásticos reciclados possuem um envelhecimento mais acentuado, aumentando a rigidez da mistura.

Os resultados estruturais e funcionais do Trecho Experimental são promissores, com todas as deflexões abaixo da deflexão admissível, demonstrando a capacidade do Asfalto com Plástico de fornecer uma superfície rodoviária resistente e durável. A avaliação do Índice de Gravidade Global (IGG) indicou uma melhoria significativa na condição da superfície do pavimento, com a eliminação de defeitos observados no pavimento primitivo. Além disso, a redução da irregularidade da superfície da rodovia e do afundamento de trilha de roda evidenciam os benefícios do Asfalto com Plástico em termos de conforto e segurança para os usuários, bem como sua capacidade de cumprir os requisitos técnicos estabelecidos.

A inovação do Asfalto com Plástico demonstra sua viabilidade técnica, ressaltando seu potencial para contribuir com a sustentabilidade ambiental, a redução de resíduos plásticos e a melhoria da qualidade da infraestrutura rodoviária. Esta pesquisa representa um avanço tecnológico em direção a um futuro



[DOI: 10.29327/1430212.49-71](https://doi.org/10.29327/1430212.49-71)

ASFALTO COM PLÁSTICO A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA EXECUTADA NO BRASIL

mais sustentável e ambientalmente consciente, e pode servir como um modelo para a adoção de soluções inovadoras e eficazes no enfrentamento da poluição plástica em âmbito nacional e internacional.

Nesse sentido, esta iniciativa tecnológica oferece uma alternativa de pavimentação de rodovias de alto desempenho com relevâncias ambientais e sociais significativas, contribuindo para a economia circular, a redução da poluição plástica e o desenvolvimento socioeconômico, enquanto promove a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DER/SP (2005) ET-DE-P00/027 – Especificação Técnica: concreto asfáltico. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, São Paulo.

DNIT 005/2003- TER. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos: Terminologia. Rio de Janeiro: IPR, 2003.

DNIT 006/2003- TER. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos: Procedimento. Rio de Janeiro: IPR, 2003.

DNIT 135/2010 – ME. Pavimentação Asfáltica – Mistura Asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

DNIT 136/2010 – ME. 136: Pavimentação Asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Método de Ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2018.

NBR 6560/2016 – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. Materiais asfálticos – Determinação do Ponto de Amolecimento – Método Anel e Bola, 2016.

NBR 6576/2007 – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. Materiais asfálticos – Determinação da Penetração, 2007.

NBR-15184/2004. Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas Elevadas usando um viscosímetro rotacional, 2004.

DNIT 006/2003 – PRO, 2003, “Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos –Procedimento”. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias - Rio de Janeiro /RJ;



AVALIAÇÃO DO USO DE GARRAFAS PET COMO AGREGADO PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RODOVIAS

Andressa Beatriz Almeida dos Santos¹; Wellington Lorrann Gaia Ferreira² & Bruno Tiago Angelo da Silva³

RESUMO

O Tratamento Superficial (TS) é um tipo de revestimento flexível que costuma ser utilizado em rodovias de baixo a médio volume de tráfego, sendo a perda de agregados no início da vida útil um de seus principais problemas. O volume de agregados utilizado no TS é elevado, estimulando a busca de alternativas mais sustentáveis que minimizem a desagregação entre os agregados e o ligante asfáltico. Nesse contexto, o Polietileno Tereftalato (PET), plástico mais reciclado em todo o país, pode ser reaproveitado em diversas indústrias, incluindo a pavimentação. O atual trabalho tem como principal objetivo verificar a viabilidade da incorporação do PET no TS. Para isso, foram preparadas em laboratório amostras de TS com 0%, 3%, 5% e 7% de PET em relação ao peso dos agregados a fim de se verificar a potencialidade de uso deste material. O desempenho do TS foi avaliado através do ensaio de desgaste por abrasão úmida (do inglês *Wet Track Abrasion Test* - WTAT). Os resultados indicaram que a amostra com 0% de PET apresentou desgaste baixo da ordem de 5,0%, enquanto as amostras com PET apresentaram valores de desgaste da ordem de 18,0%. No entanto, os valores de desgaste das amostras com PET estão próximos de outros estudos encontrados na literatura que utilizaram agregados convencionais. Acredita-se que a quantidade e a forma do agregado PET utilizado nesta pesquisa pode ter impactado no aumento do desgaste. Portanto, o uso do PET no TS ainda precisa ser mais investigado e pode ser uma alternativa sustentável viável.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento superficial duplo; sustentabilidade; PET; desgaste.

ABSTRACT

Surface Treatment (TS) is a type of flexible coating that is usually used on highways with low to medium traffic volumes, with the loss of aggregates at the beginning of their useful life being one of their main problems. The volume of aggregates used in TS is high, stimulating the search for more sustainable alternatives that minimize the disintegration between the aggregates and the asphalt binder. In this context, Polyethylene Terephthalate (PET), the most recycled plastic across the country, can be reused in several industries, including paving. The main objective of the current work is to verify the feasibility of incorporating PET into TS. To this end, TS samples were prepared in the laboratory with 0%, 3%, 5% and 7% PET in relation to the weight of the aggregates in order to verify the potential use of this material. The performance of the TS was evaluated using the Wet Track Abrasion Test - WTAT. The results indicated that the sample with 0% PET showed low wear of the order of 5.0%, while the samples with PET showed wear values of the order of 18.0%. However, the wear values of PET samples are close to other studies found in the literature that used conventional aggregates. It is believed that the quantity and shape of the PET aggregate used in this research may have impacted the increase in wear. Therefore, the use of PET in TS still needs to be further investigated and may be a viable sustainable alternative.

KEY WORDS: Double surface treatment; sustainable; PET; abrasion.

^{1,2,3} Universidade Federal Rural do Semi-Arido (UFERSA), andressabeatriz1@hotmail.com; wellington.ferreira@ufersa.edu.br; brunoangelo@ufersa.edu.br



DOI: [10.29327/1430212.49-61](https://doi.org/10.29327/1430212.49-61)

AVALIAÇÃO DO USO DE GARRAFAS PET COMO
AGREGADO PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RODOVIAS

1 INTRODUÇÃO

O revestimento asfáltico em geral visa garantir a segurança e o conforto do usuário, proteger as camadas inferiores dos agentes naturais, e transmitir as ações do tráfego para as camadas adjacentes. Entre os tipos de revestimento utilizados em pavimentos asfálticos, pode-se dividir aqueles usinados, isto é, preparados em usinas de asfalto e que costumam ser utilizados em vias de elevado volume de tráfego, um exemplo é o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ); e aqueles produzidos em campo, a exemplo do Tratamento Superficial (TS), o mais utilizado em vias de baixo volume de tráfego.

O TS é executado a partir da aplicação de uma ou mais camadas de ligante asfáltico (geralmente emulsão asfáltica) e agregados compactados. A adesão entre os agregados e a emulsão asfáltica é fundamental para garantir a qualidade do revestimento para evitar e/ou amenizar o deslocamento do agregado nos primeiros anos de sua vida útil, porém, com os efeitos do tráfego, da ação climática e do envelhecimento, o deslocamento dos materiais durante a vida útil é inevitável, fazendo com que surjam panelas e fissuras (BERNUCCI *et al.*, 2010).

O uso de recursos naturais como pedras, areias, cascalhos e petróleo é expressivamente elevado na construção de rodovias, estimulando esforços contínuos para encontrar alternativas mais sustentáveis, como o uso de materiais reciclados. Com isso, a aplicabilidade desses resíduos faz-se necessária para evitar o esgotamento dos aterros sanitários e principalmente para reduzir o uso de recursos naturais. Por esse motivo, a inclusão de materiais alternativos na pavimentação vem sendo objeto de estudo há décadas. Pesquisadores como Silva (2023) avaliaram o uso da borracha de pneus como agregado no CBUQ, Sousa (2021) avaliou o uso de resíduos sólidos nas camadas granulares do pavimento, ambos tendo como objetivo comum melhorar as características mecânicas dos materiais.

Nesse contexto, o PET é um dos resíduos mais gerados pelos brasileiros, com 23,5 toneladas coletadas no ano de 2019, sendo o tipo de plástico mais reciclado em todo o país (ABRELPE, 2021). Por conta da versatilidade na aplicação, o material PET está sendo explorado de diversas maneiras na construção civil, tais como na composição de blocos de concreto (CÂNDIDO *et al.*, 2014), como agregado miúdo em argamassas (CANELLAS; D'ABREU, 2005), e como modificador de ligante asfáltico (TAVARES, 2018). A maioria dos trabalhos investigam o uso do PET em misturas usinadas, porém ainda é restrito os estudos referentes a utilização desse material em misturas preparadas em campo, como o TS.

Dessa forma, a aplicação de garrafas PET fragmentadas, como agregado alternativo no TS, pode ser uma forma de reutilização desse material. Além disso, acredita-se que o material PET pode contribuir na adesão agregado-ligante. Devido à grande demanda de resíduos sólidos provenientes de garrafas PET, esse trabalho tem como principal objetivo verificar a viabilidade da incorporação do PET como agregado no TS.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) classifica e determina a sistemática da execução do TS como: Tratamento Superficial Simples (TSS), Tratamento Superficial Duplo (TSD) e Tratamento Superficial Triplo (TST). Essa divisão refere-se ao número de aplicações de camadas de ligante asfáltico e agregados. A Figura 1 mostra uma ilustração dos três tipos de TS.

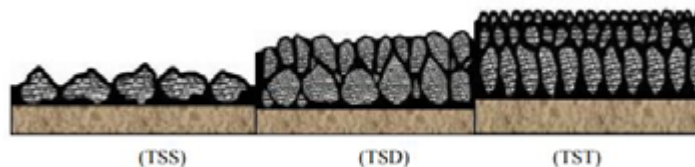


Figura 1. Tipos de Tratamento Superficial (Loiola, 2009).

O TSS é a camada do revestimento que recebe apenas uma aplicação de ligante e agregado, no TSD e no TST as camadas de agregados são de granulometrias distintas permitindo uma sinergia entre elas, uma vez que os agregados menores preenchem os espaços entre os agregados maiores. Portanto, a camada de agregado mais fino na superfície proporciona uma base sólida para a camada de agregado médio e a camada de agregado graúdo. A textura gerada pela última camada ajuda a reforçar a aderência e a proteção do pavimento otimizando o desempenho global do TS, prolongando a vida útil e garantindo a segurança dos usuários (PEREIRA, 2013).

No entanto, um dos principais defeitos desse revestimento se deve à perda de agregados, que no início da vida útil pode estar relacionada a fraca ligação agregado-emulsão que não é suficiente para resistir aos esforços do tráfego e/ou pode também estar atrelada a fatores característicos dos materiais que afetam essa particularidade, como: porosidade, capacidade de absorção, forma e textura do agregado e tipo de emulsão. Essa falta de adesão agregado-emulsão ao longo da vida útil do pavimento pode se dar também devido as quantidades inadequadas de agregados e ligante, ruptura precoce da emulsão, equipamentos inadequados na execução, e outros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com área de aproximadamente 1.096 km², o município de Caraúbas, está localizado na microrregião da Chapada do Apodi, no Rio Grande do Norte (RN) e possui atualmente cerca de 19.577 habitantes (IBGE, 2022). O tráfego na região é baixo, o que justifica avaliar o uso de revestimentos com menor custo, caso do TS.

3.1 Materiais

A cidade de Caraúbas/RN conta com o apoio da Associação Caraubense de Reciclagem Serviços e Educação Ambiental (ACRESEA) para promover a participação da população na coleta e reciclagem dos resíduos sólidos gerados, além de oferecer educação ambiental e possibilitar a geração de renda através da coleta. Os últimos registros fornecidos pela ACRESEA, referentes a coleta de PET no primeiro semestre de 2023, apontam uma média mensal de aproximadamente 3.466 Kg desse material. Esse número implica em mais de 40 toneladas de resíduos sólidos somente do tipo PET, gerados anualmente na cidade.

O material que chega nas instalações da coletora é separado por cor e tipo, alguns são prensados e destinados às indústrias para a logística reversa e outros são beneficiados e transformados em vassouras pela própria empresa. Para o estudo em questão, foi utilizado o PET cortado manualmente em pequenas partículas, com auxílio de uma tesoura e dimensões médias de até 2cm de comprimento e 0,15cm de largura. Na Figura 2 é possível observar os processos citados.



DOI: [10.29327/1430212.49-61](https://doi.org/10.29327/1430212.49-61)

**AVALIAÇÃO DO USO DE GARRAFAS PET COMO
AGREGADO PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RODOVIAS**

- a) Como o material chega na coletora. b) Material prensado. c) Vassouras produzidas pela ACRESEA. d) PET beneficiado.



Figura 2. Processos logísticos da ACRESEA.

Os agregados minerais utilizados foram as britas 3/4'' (19mm) e 3/8'' (9,5mm). O ligante asfáltico utilizado foi a Emulsão Asfáltica Catiônica de Ruptura Rápida (RR-2C). A Figura 3 ilustra os materiais mencionados.

- a) Brita 3/4''. b) Brita 3/8''. c) Emulsão RR-2C.



Figura 3. Materiais (agregados e emulsão).

3.2 Métodos

Os ensaios foram realizados no laboratório da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), campus Caraúbas/RN, exceto o de desgaste por abrasão úmida, realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (UFC), localizado em Fortaleza/CE.

3.2.1 Caracterização dos Agregados

A granulometria dos agregados foi analisada com base na norma DNER-ME 083/98, que estabelece a análise granulométrica através do ensaio de peneiramento. Para cada um dos agregados foi feito o peneiramento de duas amostras. A resistência ao desgaste das britas 3/4'' e 3/8'' foi avaliada a partir do ensaio de Abrasão "Los Angeles" como recomendado pela norma DNER – ME 035/98. O ensaio de absorção e densidade foi realizado conforme a norma DNIT 413/2019 – ME, que prescreve o processo para determinação de massa específica, densidade e absorção de



agregados graúdos para misturas asfálticas. Por fim, foram realizados os ensaios de índice de forma (ABNT NBR 6954/89) e adesividade ao ligante (DNER-ME 078/94).

3.2.2 Determinação da Taxa de Agregado e da Taxa de Ligante Asfáltico

Optou-se por avaliar um TSD utilizando a brita 3/4” (como primeira camada) e a brita 3/8” (como segunda camada). Para a determinação da taxa de agregado, foi utilizado o método do mosaico, que, segundo Loiola (2009), é o método que melhor representa a dinâmica de execução em campo. O método consiste em espalhar os agregados em uma placa ou bandeja de área conhecida (44cm × 30cm × 6cm), de modo a cobrir toda a superfície sem que fiquem falhas ou sobreposições, como mostra a Figura 4.



Figura 4. Execução do método do Mosaico.

Calculou-se a taxa de agregado graúdo (T_g) pela Equação (1). Onde: P_t é peso da bandeja com o agregado (kg); P_p é peso da bandeja (kg); e A é área da bandeja (m^2) (DNIT 147/2012-ES).

$$T_g = (P_t - P_p) / A \quad (1)$$

A taxa de emulsão foi calculada de acordo com Loiola (2009), a partir da Equação (2), onde: $T_{(RR-2C)}$ é a taxa da emulsão asfáltica catiônica RR-2C(L/m²); e T_{ag} é a taxa do agregado.

$$T_{(RR-2C)} = 0,112 \times T_{ag} \quad (2)$$

3.2.3 Resistência ao Desgaste

O ensaio *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) foi realizado conforme a norma ABNT NBR 14746. A norma define como avaliar a resistência ao desgaste de TS em condições de tráfego simuladas através de um ensaio de abrasão úmida, e fornece diretrizes para determinar a proporção ideal de emulsão para diferentes misturas de agregados e aditivos, cujo desgaste é calculado de acordo com a Equação (3), onde: A é abrasão ao desgaste úmido; P_1 é a massa inicial do revestimento e P_2 a massa final pós-ensaio.

$$A = ((P_1 - P_2) / P_1) \times 100 \quad (3)$$

Apresenta-se a seguir os processos utilizados para realização do ensaio WTAT, utilizando como referência os trabalhos de Loiola (2009) e Araújo (2019): a) colocou-se sobre uma placa



DOI: [10.29327/1430212.49-61](https://doi.org/10.29327/1430212.49-61)

**AVALIAÇÃO DO USO DE GARRAFAS PET COMO
AGREGADO PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RODOVIAS**

circular metálica uma manta asfáltica e um molde de ferro com diâmetro de 28cm e espessura de 1cm, esse conjunto foi pesado utilizando uma balança de precisão (Figura 5a); b) aplicaram-se as taxas de agregados e de emulsão referentes ao número de camadas (Figuras 5b e 5c); c) compactação feita com o auxílio de um cilindro de concreto (Figura 5d); d) em seguida o conjunto foi colocado na estufa a 60°C por 24h para que toda a água presente na emulsão evapore, acelerando seu processo de cura (Figura 5e); e) o revestimento foi removido da estufa e permaneceu em temperatura ambiente por 1h; f) fez-se a pesagem do revestimento seco antes de ser submetido aos ensaios; g) cobriu-se completamente a amostra com água durante 10 minutos (Figura 5f) e h) a amostra foi então submetida ao ensaio de WTAT (Figura 5g); i) lavou-se o revestimento pós-ensaio, foi colocado na estufa por 2h a 60°C e pesado novamente, para calcular o desgaste. A Figura 5h mostra o revestimento após o ensaio.



Figura 5. Procedimentos para realização dos ensaio WTAT.

Para comparação dos dados, foi produzida um TSD convencional (0% de PET), e as outras 3 substituindo uma parcela da brita 3/8” por porcentagens diferentes de PET, respectivamente 3%, 5% e 7%. Esse percentual de PET foi aplicado entre a segunda camada de emulsão e a segunda camada de agregado.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos Agregados

4.1.1 Análise Granulométrica

A Figura 6 mostra as faixas granulométricas para cada camada do TSD, determinadas pelo DNER-ME 083/98 e os resultados referentes aos ensaios de granulometria realizado em cada tipo de agregado. As britas possuem graduação uniforme, o que significa que as partículas que compõem o agregado são distribuídas em uma faixa de tamanhos específica, com limites superior e inferior bem definidos. As duas juntas são uma boa combinação para o TSD, usando a brita 3/4" na 1ª camada e a brita 3/8" na 2ª camada.

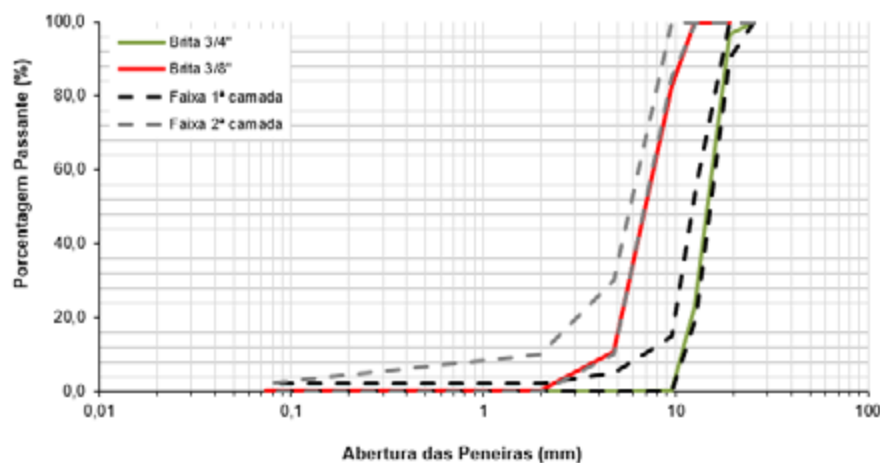


Figura 6. Representação dos resultados da granulometria em gráfico (Autor, 2023).

4.1.2 Índice de Forma e Adesividade

Segundo a norma do DNIT 031/2006, que determina especificações de serviço para os pavimentos flexíveis, o valor limite para o índice de forma de agregados graúdos usados em TSD não deve ser inferior a 0,5. A classificação de forma é dada a partir dos valores médios do comprimento (A), largura (B) e espessura (C) dos agregados. A Tabela 1 apresenta os resultados de índice de forma do agregado graúdo (brita 3/4").

Tabela 1. Resultados do índice de forma.

Material	A médio (mm)	B médio (mm)	C médio (mm)	B/A	C/B	Classificação
Brita 3/4"	25	17	10	0,68	0,59	Cúbica

Os resultados da adesividade são obtidos visualmente. Na Figura 7, nota-se que os resultados não foram totalmente satisfatório, pois observou-se pontos brancos ao longo dos agregados indicando que não houve completo recobrimento ao término das 72 horas.

DOI: [10.29327/1430212.49-61](https://doi.org/10.29327/1430212.49-61)

AVALIAÇÃO DO USO DE GARRAFAS PET COMO AGREGADO PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RODOVIAS



Figura 7. Resultado do ensaio de adesividade.

4.1.3 Absorção e Abrasão Los Angeles.

De acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES, os valores limites para abrasão de um agregado usado em pavimentos flexíveis devem ser igual ou inferior a 50%. A partir dos resultados obtidos nos ensaios de abrasão como mostra a Tabela 2, observou-se que os materiais utilizados nesse estudo possuem boa resistência ao desgaste, dentro do limite indicando em norma. Ressalta-se a absorção maior da brita 3/8” que pode indicar maior consumo de ligante asfáltico.

Tabela 3. Resultados obtidos para os ensaios com as britas 3/4" e 3/8”.

Parâmetro	Brita 3/4”	Brita 3/8”
Absorção (%)	0,57	1,04
Abrasão Los Angeles (%)	24,34	28,62

4.2 Avaliação do Desgaste

No processo de produção das amostras de TSD, a partir de amostras experimentais, verificou-se que as taxas de agregado e ligante calculadas de acordo com as equações 1 e 2 geraram quantidade excessiva de material em relação a área de aplicação no formato circular como apresentado na Figura 5a. Então, optou-se por adotar taxas menores, que mais se assemelha à execução em campo. Outros autores, como Loiola (2009) e Araújo (2019) já alertaram sobre esse ponto, e também fizeram uso de adaptações nas taxas, por considerarem a ocorrência de variações durante as aplicações em campo, realizadas por processos mecanizados. A Tabela 3 mostra os resultados das taxas calculadas e adotadas pelo autor. Para fins de comparação, foram utilizados resultados obtidos por Araújo (2019).

Tabela 3. Taxas de agregado e emulsão.

Agregado	Araújo (2019)		Taxa Calculada (presente estudo)		Taxa Adotada (presente estudo)	
	Agregado (Kg/m ²)	Emulsão RR-2C (L/m ²)	Agregado (Kg/m ²)	Emulsão RR-2C (L/m ²)	Agregado (Kg/m ²)	Emulsão RR-2C (L/m ²)
Brita 3/4"	12,6	0,82	21,94	2,46	18	2,02
Brita 3/8"	5,8	1,23	8,85	0,99	7	0,78



Optou-se por manter as taxas de aplicação fixas, variando apenas as porcentagens de PET nas amostras, com o objetivo de eliminar essa variável na comparação e assim avaliar a quantidade ótima de PET a ser utilizada. Os resultados do ensaio WTAT apresentados na Figura 8.

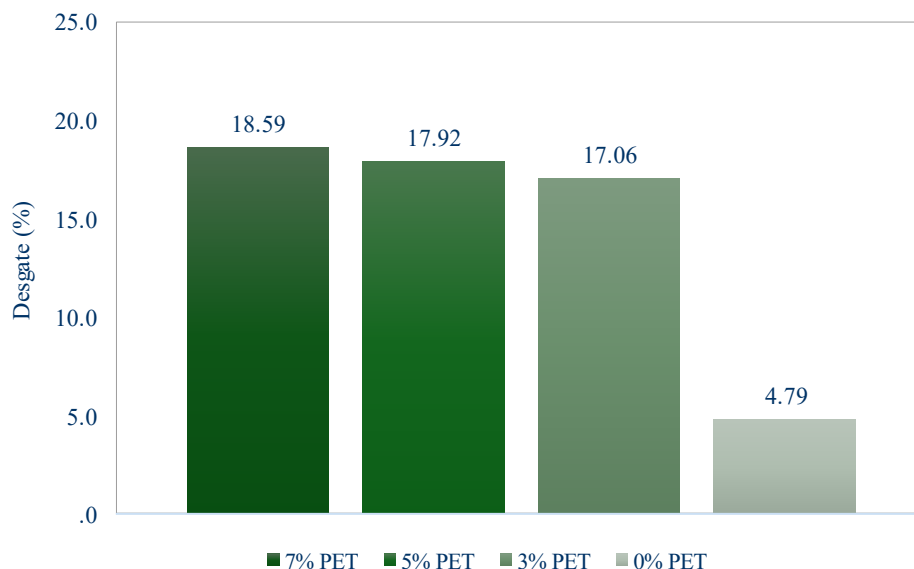


Figura 8. Resultados WTAT.

À vista dos resultados, nota-se que o TSD que melhor apresentou resultados é o que não possui PET, visto que possui um menor desgaste (4,79%). Este resultado já era esperado, pois não existe interferência de material alternativo. Entretanto, se observarmos apenas os 3 TSDs com PET, à medida que o teor de PET aumenta, o desgaste também ligeiramente aumenta.

Esperava-se que com o uso do PET no TSD, os resultados de WTAT fossem pelo menos similares aos resultados da amostra sem PET. Como isso não foi observado, acredita-se que esse resultado está diretamente ligado ao tratamento do PET anterior à sua aplicação, tais como: i) o tamanho das partículas do PET pode ter causado uma má adesão com os demais materiais, isto é, com dimensões menores e mais próximas de um pó, esse material poderia provocar uma melhor ligação entre os agregados e a emulsão, além de preencher os espaços vazios entre as britas e assim melhorar a capacidade de resistência da mistura; ii) a temperatura com que esse material se encontra, visto que na temperatura ambiente o PET não está totalmente amolecido para gerar uma melhor ligação com os agregados minerais e o ligante asfáltico. Todavia, foi feita a média do desgaste dos revestimentos com PET e foram comparados com resultados de trabalhos que utilizaram apenas os materiais convencionais, que são as britas 3/4" e 3/8" e a emulsão RR-2C, e o mesmo ensaio de WTAT.



DOI: 10.29327/1430212.49-61

AVALIAÇÃO DO USO DE GARRAFAS PET COMO
AGREGADO PARA TRATAMENTO SUPERFICIAL DE RODOVIAS

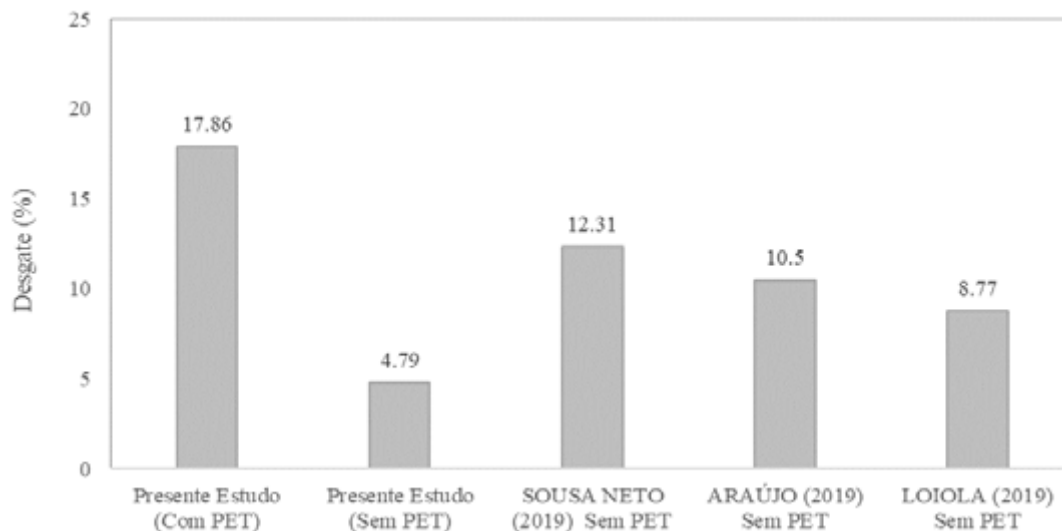


Figura 9. Comparação dos resultados de desgaste.

Dos resultados apresentados na Figura 9, é possível observar que a amostra com PET apresenta valor mais alto de desgaste, porém próximos aos resultados obtidos por Sousa Neto (2019), aproximadamente 5% de diferença. Já quando comparado com os resultados obtidos por Araújo (2019) e Loiola (2009), a diferença percentual é de 7,36% e 9,09%, respectivamente. De fato, as amostras de TSD que não contém PET são mais resistentes à abrasão, como inclusive os resultados do presente estudo apontam. No entanto, a diferença percentual do TSD com PET e dos outros estudos sem uso de PET é abaixo de 10%, valor considerado razoável para um material que usa agregado alternativo.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foram avaliadas a aplicabilidade e a viabilidade da inserção do PET como agregado em um TSD, visando a sustentabilidade e a melhoria com relação a perda de agregados. Com isso, esperava-se que o uso do PET melhorasse a ligação entre os agregados e a emulsão, uma vez que o PET junto com a emulsão poderia aderir melhor à superfície do agregado, porém isso não foi observado nos resultados obtidos, possivelmente por conta da forma e do tamanho do agregado PET. Acredita-se que agregados PET menores podem proporcionar resultados melhores, além do aquecimento do PET antes da aplicação, o que pode melhorar a adesão. Entretanto, a partir da avaliação do desgaste nas amostras e por meio de comparações com outras pesquisas, foi possível constatar que o PET, apesar de não resultar no desempenho esperado, ainda é um material leve e volumoso, que pode ser empregado em pequenas quantidades, sem perda de adesão significativa, se comparado a outros TSD encontrados na literatura. O volume de agregados é tão grande no TS que qualquer redução de uso de agregados naturais é fundamental do ponto de vista ambiental.



REFERÊNCIAS

ABRELPE (2021). PANORAMA DO RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2021.

ARAÚJO, A. M. (2019) Estudo Laboratorial De Tratamento Superficial Duplo Utilizando Britas Convencionais. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), São Luís/MA, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 14746/14: Microrrevestimento a frio e lama asfáltica – determinação de perda por abrasão úmida (WTAT). Rio de Janeiro, 2014.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.; CERATI, J.A.P.; SOARES, J.B. (2010) Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 3ª Edição. Rio de Janeiro, RJ.

CÂNDIDO, L.F.; BARRETO, José M. L.; CABRAL, A. E. B. (2014). Avaliação de Blocos de Concreto Produzidos Com PET Reciclado. XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Constuído, 12-14 de Novembro, Maceió/AL, Brasil.

CANELLAS, S. S.; D'ABREU, J.C. (2005). Reciclagem de Pet, Visando d Substituição de Agregado Miúdo em Argamassa. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

DNER. DNER-ME 083/98: Agregados - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DNER. DNER-ME 078/94: Agregado Graúdo - Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

DNER. DNER-ME 086/94: Agregados - Determinação do Índice de Forma. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 035/98: Agregados: Determinação da abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 1998.

DNIT. DNIT - 147/2012 ES: Pavimentação Asfáltica - Tratamento Superficial Duplo - Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2012.

DNIT – 413/2019 ME: Pavimentação - Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

DNIT (2006). Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro: Publicação IPR – 729.

LOIOLA, P. R. R. (2009) Estudo de Agregados e Ligantes Alternativos para Emprego em Tratamentos Superficiais de Rodovias. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza/CE, Brasil.

PEREIRA, S. L.O (2013). Avaliação dos Tratamentos Superficiais Simples, Duplo e Triplo de Rodovias Através do Emprego de Diferentes Agregados de Região Metropolitana de Fortaleza. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza/CE, Brasil.

SILVA, D.M.S. (2023). Uso da Borracha de Pneus Inersíveis na Pavimentação Asfáltica. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Alagoas. Maceió/AL, Brasil.

SOUSA NETO, A. P. (2019). Estudo Laboratorial de Tratamento Superficial Duplo Utilizando Seixo Rolado. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), São Luís/MA, Brasil.

TAVARES, A. L. N. R. (2018). Estudo das Propriedades Físicas e Químicas do Ligante Asfáltico Cap 50/70 Modificado por Adição De PET Triturado. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, Brasil.



Estudo de Caso: Utilização de Resíduos de Mineração na Manutenção de Estrada não Pavimentada na Malha da 26ª Unidade Regional do DER/MG

Samuel Passos Ribeiro Rodrigues e Silva¹; Érica Francisca de Paula Araújo¹; Vinicius Vieira Sousa¹; Elziane Rezende Ferreira Magri¹

RESUMO

O Estado de Minas Gerais é um dos maiores produtores e mais importantes produtores de minérios no Brasil, e o calcário uma das principais substâncias beneficiadas no estado e no país. A atividade extrativa de minérios é largamente conhecida por produzir um intenso volume de resíduos sólidos e há muito vem se discutindo no país formas alternativas ao simples descarte destes resíduos, de forma a proporcionar soluções economicamente viáveis a problemática do excesso de resíduos gerados pela atividade e assim torná-la mais sustentável, e causadora de um menor impacto ambiental. Em paralelo as obras de engenharia e em especial as obras de infraestrutura e engenharia rodoviária, são grandes consumidoras de matéria prima tendo em vista as elevadas extensões e os elevados volumes de materiais diversos que são exigidos para a garantia da qualidade das obras deste setor. A manutenção de estradas não pavimentadas segue a regra e anualmente demanda um elevado volume de material para a manutenção e a garantia da qualidade de rolamento destas vias. A 26ª URG do DER-MG atualmente é responsável pela manutenção de 293,8Km de rodovias não pavimentadas o que faz com que a necessidade de cascalho ou outros materiais granulares para a reabilitação da via sejam constantes. Contudo, com a ideia de proporcionar exercícios de reabilitação menos danosos e agressivos ao meio ambiente foi realizado um estudo que busca entender a viabilidade da utilização de estéréis provenientes da mineração de calcário agrícola na manutenção da LMG658.

PALAVRAS-CHAVE: Estradas não Pavimentadas; Resíduos da Mineração; Reaproveitamento de Resíduos; Pavimentação

ABSTRACT

The state of Minas Gerais is one of the largest and most important mineral producers in Brazil, with limestone being one of the main substances processed in the state and the country. The mining activity is widely known for generating a large volume of solid waste, and there has long been discussion in the country about alternative ways to dispose of these wastes, in order to provide economically viable solutions to the problem of excess waste generated by the activity, thus making it more sustainable and causing less environmental impact. In parallel, engineering works, especially infrastructure and road engineering works, are major consumers of raw materials due to the extensive lengths and volumes of various materials required to ensure the quality of works in this sector. The maintenance of unpaved roads follows this rule and annually demands a high volume of material for maintenance and to ensure the quality of the road surface. The 26th URG of DER-MG is currently responsible for maintaining 293.8 km of unpaved roads, which results in a constant need for gravel or other granular materials for road rehabilitation. However, with the idea of providing rehabilitation exercises that are less harmful and aggressive to the environment, a study was conducted to understand the feasibility of using sterile materials from agricultural limestone mining in the maintenance of LMG658.

KEY WORDS: Unpaved Roads; Mining Waste; Waste Reutilization; Pavement

1 Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais – DER/MG, samuel.passos@der.mg.gov.br; erica.araujo@der.mg.gov.br; vinicius.sousa@der.mg.gov.br; zana.magri@der.mg.gov.br



INTRODUÇÃO

Segundo o Departamento de Edificações e Estradas de Rodagens de Minas Gerais, o estado mantém atualmente um total de 5.129,80 Km de rodovias não pavimentadas. A manutenção destas vias é anualmente fator gerador de demandas para o estado, exigindo a alocação de recursos tanto econômicos quanto recursos naturais que são cotidianamente despendidos para garantir a qualidade de rolamento destas rodovias. No trecho mantido pela 26ª URG do DER MG dos 666,50 Km correspondentes a totalidade da malha conservada pela unidade regional 44% ou 293,8Km são referentes a rodovias não pavimentadas. Sendo que as vias não pavimentadas exigem trabalhos constantes de manutenção. Serviços como o de conformação mecânica do leito estradal e, mais importante, o encascalhamento. O simples lançamento de material granular na superfície de rolamento da via é de grande importância para a revitalização da qualidade da pista de rolamento, principalmente após a estação chuvosa do ano. O encascalhamento é de extrema importância para o recobrimento das panelas que surgem durante a estação chuvosa e para devida regularização da pista de rolamento, uma vez que uma simples conformação mecânica muitas vezes não é capaz de conferir ao leito estradal a regularidade e qualidade necessárias para manter o conforto do tráfego. Entretanto a prática corriqueira deste serviço exige um volume expressivo de material granular, em preferência material granular de qualidade para possibilitar a execução do serviço, contudo a disponibilidade do material natural adequado para este fim é cada dia mais escasso.

Como resposta a esta escassez foi realizado um trabalho em busca de alguns materiais alternativos com possibilidade de substituírem o cascalho natural para a execução do serviço de encascalhamento em uma estrada não pavimentada, um dos materiais observados e analisados foi o rejeito proveniente da extração de calcário, exercício de mineração comum na região e que é responsável pela produção de um volume expressivo de estéreis.

Segundo Rezende (2016) o estado de Minas Gerais ainda hoje é o estado que mais produz mineiro, ainda segundo o artigo as reservas medidas de minério no país indicam um total de 28,9 bilhões de toneladas, sendo que 67% de todo este volume está presente em Minas Gerais, que apenas no ano de 2014 foi responsável por produzir 800.684.546,79 reais. Ainda segundo a já citada Rezende (2016) a atividade mineira deve apresentar elementos que sejam condizentes com desenvolvimento sustentável, de forma que tenha elementos de controle que sejam utilizados em benefício do desenvolvimento regional sustentável. Desta forma a utilização do rejeito estéril desta atividade extrativa para um fim útil acaba sendo de elevada importância para a diminuição do impacto ambiental gerado pela atividade extrativa mineira.

Já as estradas não pavimentadas, também acabam sendo grandes atores no que se refere a impactos ambientais a alterações em áreas vizinhas, uma vez que para a extração de cascalho para a manutenção destas áreas são exploradas jazidas com elevado volume do material, o que por sua vez acarreta a necessidade de limpeza e retiradas de material vegetal, corte de árvores, além da indispensável escavação do local para retirada do material. Contudo, conforme explicita o Marinheski (2017) as estradas não pavimentadas acabam representando o início de toda a movimentação econômica de uma região, uma vez que estas estão conectadas de maneira direta a áreas produtivas, desta forma a manutenção e a garantia da boa qualidade de rolamento destes trechos é vital, tendo em vista a sua grande parcela de contribuição econômica, portanto assim como existe a necessidade de se pensar soluções sustentáveis para a problemática dos estéreis gerados em processos de mineração, existe a necessidade de se planejar a manutenção de estradas não pavimentadas de forma sustentável.



DOI: [10.29327/1430212.49-58](https://doi.org/10.29327/1430212.49-58)

ESTUDO DE CASO:

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA MANUTENÇÃO DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA NA MALHA DA 26ª UNIDADE REGIONAL DO DER/MG

Com a intenção de apresentar uma resposta prática e viável às problemáticas apresentadas acima foi realizado o estudo para entender a viabilidade técnica e a possibilidade da utilização de estéreis da extração de calcário na manutenção de estradas não pavimentadas da malha da 26ª Unidade Regional do DER MG. Desta forma por questões práticas e técnicas o material foi aplicado na rodovia LMG658. Sendo uma rodovia de ligação e responsável por conectar a as rodovias BR251 a rodovia BR040 a LMG658 é o principal trecho de escoamento de uma das maiores e mais importantes regiões de produção agrícola da região do noroeste mineiro, com 101,9 Km de extensão a rodovia abrange os municípios de Paracatu e Unaí, em uma localidade responsável por uma intensa produção de grãos, no ano de 2021, segundo o IBGE, os dois municípios em conjunto foram responsáveis por produzir um total de R\$ 3.972.195.000,00 apenas em grãos (milho, soja, sorgo, trigo e feijão). Como grande parte desta produção de grão vem diretamente deste trecho conectado pela LMG658, a rodovia apresenta um intenso tráfego de veículos pesados, responsáveis por transportar insumos e produtos para a produção local.

REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Sá *et al.* (2021) o processo de mineração é responsável pela geração de dois tipos principais de resíduos sólidos, são eles os estéreis e os rejeitos, sendo que os estéreis, também chamados de lavra, são todo o material gerado através do processo extrativo, que ficam dispostos em pilhas e não apresentam valor econômico. Segundo Santos (2015) os estéreis quando empilhados e depositados sem controle são fatores causadores de ocupação física desordenada do solo, além de inibirem a o crescimento de diversas espécies vegetais, além de aumentar a acidez do solo e favorecer a aridez do terreno.

Ainda segundo Sá *et al.* (2021), para a gestão dos resíduos sólidos do minério, a reciclagem e o reuso dos materiais são alternativas mais adequadas do que a simples disposição destes. Uma das alternativas que o autor cita para a minimizar os impactos associados a simples disposição destes materiais é a sua utilização em obras de engenharia, como por exemplo em obras de infraestrutura rodoviária. Desta forma é comum observar trabalhos de autores que propõem alternativas para a utilização tanto de estéreis quanto de produtos derivados do calcário. Machado *et al.* (2015) estudou a possibilidade do aproveitamento do rejeito de caieiras na melhoria dos índices de resistência em materiais de pavimentação. Medeiros (2019) analisou a possibilidade da utilização da escoria siderúrgica de alto forno e estéreis de mineração como alternativa para serviços de revestimento primário em estradas não pavimentadas. Desta forma é possível observar que existe uma vasta gama de estudos e possibilidades para a aplicação de resíduos sólidos provenientes da atividade mineira como alternativa para atividades de engenharia rodoviária.

Este trabalho segue a linha proposta no parágrafo anterior e propõe a utilização de estéreis em serviços de manutenção rotineira em estradas não pavimentadas. Para a utilização destes produtos é necessário ter em mente o tipo de material adequado para a utilização neste tipo de serviço. Conforme apontam Skorseth & Selim (2000) no Gravel Roads: Maintenance and Desing Manual, publicado pelo U.S. Department of Transportation, muitas vezes a culpa pela má qualidade do serviço após a utilização de material inapropriado muitas vezes pode recair sobre o operador do maquinário. Contudo, não consegue transformar um material pobre em bom material, por isso é preciso ter em mente que o material utilizado na manutenção de estradas não pavimentadas deve estar de acordo com alguns requisitos. Os autores ainda chamam a atenção para a diferenciação entre o material utilizado para a aplicação em superfícies de rolamento e em outras utilizações,



Samuel Passos Ribeiro Rodrigues e Silva,
Érica Francisca de Paula Araújo,
Vinicius Vieira Sousa,
Elziane Rezende Ferreira Magri

como em bases e sub-bases. Segundo os autores existem duas grandes diferenças entre o material granular utilizado para bases e o material utilizado em superfícies de rolamento. Um bom material granular para bases vai apresentar uma grande porcentagem de material de fração grossa maior e uma porcentagem bastante pequena de finos. Um bom material para a aplicação em faixas de rolamento de rodovias não pavimentadas vai apresentar uma maior quantidade de material passante na peneira #200. Para materiais de base o passante na peneira #200 vai de 3% a no máximo 12%, enquanto para o material que deve ser aplicado em superfícies o limites são de 4% a no máximo 15%. Skorseth & Selim (2000) afirmam que esta gradação é vital para garantir a resistência e a drenagem necessária para matérias de base, contudo este tipo de material não irá selar, ou criar uma crosta que mantém o material granular unido em uma superfície de rolamento de uma estrada não pavimentada. Outro fator importante é o índice de plasticidade do solo, Skorseth & Selim (2000) apontam que para a necessidade de um IP maior em casos de materiais destinados a manutenção de rodovias não pavimentadas. Os autores apontam que os limites de IP para esses casos devem ser de no mínimo 4 até no máximo 12, enquanto para materiais de base o IP já deve estar entre 0 a 6.

Tabela 1 - Exemplo de gradação para materiais de base e superfície de rolamento. fonte: Skorseth & Selim (2000)

Peneira	Material para Base (% Passante)	Material para Superfície de Rolamento (% Passante)
1"	100	
¾"	80-100	100
½"	68-91	
No.4	46-70	50-78
No.8	34-54	37-67
No.40	13-35	13-35
No.200	3-12	4-15
Índice de Plasticidade (IP)	0-6	4-15

Vale destacar que segundo Skorseth et al. (2015) aponta que os valores passantes na peneira #200 podem ser modificados ainda para o limite de 8 a 15 para se obter maior performance. Contudo vale notar que o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, em sua norma técnica DNIT 141/2022 – ES, aponta valores diferentes para as faixas granulométricas de materiais para base estabilizada granulometricamente. É importante ressaltar ainda que a norma técnica DNIT 445/2023 – Revestimento Primário – Especificação de Serviço apresenta valores para IP dentro do limite de 7% a 12%, além de atrelar estes valores ao volume médio precipitado no local onde a estrada está implantada, conforme pode ser observado na tabela 2. A norma estabelece ainda que o CBR deve ser $\geq 20\%$ e expansão $\leq 1\%$ na energia intermediária ou na que estiver especificada em projeto, importante também observar que a normativa estabelece um Limite de Liquidez de $\leq 35\%$.

Tabela 2 - Índice de Plasticidade Máximo, fonte: DNIT (2023)

Altura das Chuvas	IP (Valor Máximo)
Até 800 mm	12%
Entre 800mm e 1500mm	9%
Maior que 1500mm	7%



DOI: [10.29327/1430212.49-58](https://doi.org/10.29327/1430212.49-58)

ESTUDO DE CASO:

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA MANUTENÇÃO DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA NA MALHA DA 26ª UNIDADE REGIONAL DO DER/MG

METODOLOGIA

Para a realização deste estudo foram realizadas a coleta e a análise do material e em seguida foi executada a aplicação do material em pista para a devida observação do seu comportamento quando submetido a ação do tráfego. O material analisado e utilizado é proveniente da empresa extratora Britacal, com sede em Brasília, a empresa mantém filiais em Unaí – MG, Cabeceiras – GO e Planaltina, no município de Unaí a empresa mantém além da filial um pátio de britagem para separação do calcário agrícola, principal produto comercializado pela empresa. A unidade operacional da empresa Britacal, responsável pela extração do calcário agrícola está presente na proximidade da rodovia LMG658, portanto sua localização é de extrema importância para a escolha da utilização do estéril produzido no local, uma vez que sua proximidade com a via é responsável por reduzir gastos referente ao transporte do material para a pista. O estéril produzido no local trata-se do produto do peneiramento que da origem ao calcário agrícola, o material granular que não se encaixa desta faixa atualmente não apresenta valor econômico para empresa e é mantido em pilhas de estéril. Desta forma foi realizada a coleta do material na pilha e levado para análise em laboratório, para a extração do material foi realizada a coleta em pontos distintos e separados ao longo da pilha de forma a proporcionar uma amostra representativa da pilha de estéril analisada, o volume colhido de material somou uma quantia total de 0,04m³ do estéril para a realização dos ensaios necessários.



Figura 1 - Pilha de estéril coletada. Fonte: Os Autores

Foi realizada após a coleta do material foram realizados os ensaios laboratoriais necessários para classificação e análise do material trabalhado. Desta forma foram realizados os seguintes ensaios: Índice de Suporte Califórnia, Expansão, Granulometria, Limites de Atterberg. Para a realização dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia foi utilizada como referência a NBR 9895/2016 a partir desta normativa foi possível obter também os índices de expansão do material. Enquanto para a determinação da granulometria do material foi utilizada a normativa NBR 7181/2016. Já para a determinação dos limites foram utilizadas as normas NBR 6459/2016 para determinação do limite de liquidez do solo e a normativa NBR 7180/2016 para determinação do limite de plasticidade. Para



a realização do ensaio, conforme a normativa NBR 9895/2016, foram realizados os moldes da quantidade de cilindros necessários para a caracterização da curva de compactação do material, logo os corpos foram moldados com teores distintos de água, e em seguida deverá ser realizada a compactação dos mesmos, para a realização dos testes deverá ser utilizada a energia Proctor Modificado, com a aplicação de um total de 27 golpes por camada de solo. Após a delimitação da curva de compactação os corpos de prova deverão ser preparados e equipados com um deflectômetro e imersos em tanque com água, em seguida deverão ser observados e anotados os valores de expansão ocorridos de 24 em 24 horas, os corpos deverão permanecer submersos por um total de 96 horas, ou 4 dias. Após as leituras de expansão deve ser executado o teste de penetração para real determinação do índice de suporte do material, logo os corpos de prova deverão ser retirados do tanque e por 15 minutos deve-se deixar a água escoar do corpo em seguida o material deve ser colocado na prensa e deve ser aplicada uma carga de aproximadamente 45N o ensaio deve ser realizado com uma taxa de deslocamento controlada a uma velocidade de 1,27mm/min. As leituras devem ser feitas em função da penetração e de um tempo especificado para o ensaio.

Após a conclusão dos ensaios necessários foram realizados estudos comparativos de forma a confrontar diferentes cenários de execução de modo a proporcionar um entendimento quanto a viabilidade da utilização do material testado, para isso foram contrapostos os valores de execução de um pano de encascalhamento com um comprimento total de 1000 metros, para a realização deste estudo foram utilizados os valores de serviços proveniente da tabela referencial de custos editada e disponibilizada pelo Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais, os valores de referencia são para a região de Paracatu. Para o comparativo foram considerados dois materiais, sendo o primeiro o estéril da mineração e, uma vez que o mesmo não apresenta valor comercial, e a empresa tem ganhos logísticos com a destinação alternativa deste material, a análise foi realizada, portanto, considerando a doação do volume de material utilizado. Já o segundo material foi o cascalho, material que é rotineiramente utilizado em serviços de manutenção e readequação de estradas não pavimentadas, para tal, foi considerado o valor de R\$ 8,00 o metro cúbico, sendo este um valor médio de mercado encontrado na região.

Foi realizada também a aplicação do material em pista, desta forma foi executado o simples espalhamento do material na faixa de rolamento, ou a execução de encascalhamento no local, desta forma foram utilizados no serviço os seguintes equipamentos: motoniveladora, caminhão pipa, caminhões basculantes. Sendo assim o material foi depositado na via e em seguida com a motoniveladora o material foi espalhado, foi realizado o acabamento necessário para garantia da qualidade da pista de rolamento, o serviço de aplicação do material na pista foi realizado com o devido humedecimento do material. Após a aplicação do material na pista, foi observado o seu comportamento quando submetido a ação do tráfego.

RESULTADOS

A fim de observar o comportamento mecânico do estéril proveniente da empresa Britacal, foram realizados os ensaios laboratoriais com o volume colhido para os testes conforme descrito no capítulo anterior, portanto foram realizados os ensaios para determinação do Índice de Suporte Califórnia do material. Para a caracterização da curva de compactação do material foi necessário o molde de 5 cilindros, numerados em ordem crescente, sendo que o cilindro 1 foi moldado com uma humidade média de 15,1%, já o cilindro 2 apresentou uma humidade média de 16,2%, o 3 foi moldado com 17,3%, por sua vez o cilindro 4 recebeu 18,4%, enquanto o cilindro 5 recebeu 19,5%



DOI: 10.29327/1430212.49-58

ESTUDO DE CASO:

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA MANUTENÇÃO DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA NA MALHA DA 26ª UNIDADE REGIONAL DO DER/MG

de humidade média, desta forma foram obtidos os resultados presentes na tabela 3, sendo possível observar a análise gráfica desta no gráfico 1.

Tabela 3 - Amostragem dos corpos de prova. Fonte: Os Autores

MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA							
A	Amostra úmida	-	6000,0				
B	Amostra seca	$A/(H\%+100) \times 100$	5473,6				
C	Água adicionada (ml)	-	300	360	420	480	540
D	Água higroscópica (%)	$(C/A) \times 100$	5%	6%	7%	8%	9%
E	Nº do molde	-	01	02	03	04	05
F	Solo+molde	-	8.100	8.420	8.400	8.340	7850
G	Molde	-	4.565	4.200	4.090	4.185	4170
H	Solo-molde	F-G	3.535	4.220	4.310	4.155	3680
I	Volume do solo	-	2.042	2.129	2.049	2.036	2023
J	Dens. úmida	H/I	1,731	1,982	2,103	2,041	1,819
K	Umidade (%)	$(C/B \times 100) + H\%$	15,1	16,2	17,3	18,4	19,5
L	Dens. seca	$J/(K+100) \times 100$	1,504	1,706	1,793	1,724	1,522

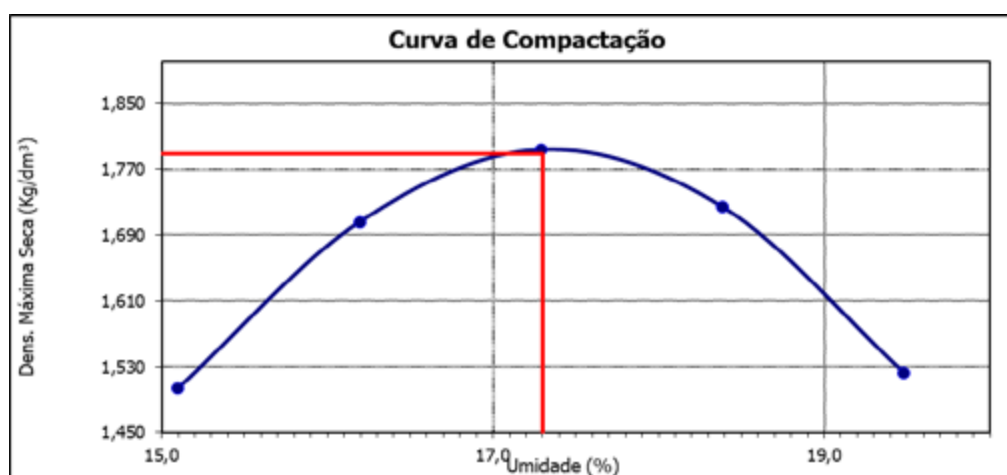


Gráfico 1 - Curva de Compactação. Fonte: Os Autores

Conforme pode ser observado na tabela acima foram encontrados os valores de humidade ótica e densidade máxima seca, sendo eles respectivamente 17,3% para humidade e 1,788g/dm³ para densidade máxima. Em seguida e com esses dados foram separadas as amostras 02, 03 e 04 para prosseguirem com os ensaios de expansão e de I.S.C. Conforme normatizado, para o ensaio de expansão forma realizadas 04 leituras, uma a cada 24 horas, em seguida foram realizados os ensaios



Samuel Passos Ribeiro Rodrigues e Silva,
Érica Francisca de Paula Araújo,
Vinicius Vieira Sousa,
Elziane Rezende Ferreira Magri

de penetração nos três corpos de prova. As tabelas com os resultados, bem como o gráfico de penetração do melhor resultado seguem abaixo:

Tabela 4 - Resultados de expansão do material. Fonte: Os Autores

Molde (Nº)			03		
Altura do molde (cm)			11,45		
-			Leitura	Difer.	Exp.
Data		Hora	(mm)	(mm)	%
18/05/2023		qui	2,00	0,00	0,00
19/05/2023		sex	1,93	-0,07	-0,06
20/05/2023		sáb	1,93	-0,07	-0,06
21/05/2023		dom	1,93	-0,07	-0,06
22/05/2023		seg	1,93	-0,07	-0,06

Tabela 5 - Resultados de penetração do material. Fonte: Os autores

Tempo Min.	Penetração mm	Pol.	Pressão Padrão	Molde Leitura	Molde Leitura	03			Molde Leitura
						Pressão Kg/m ²	ISC	%	
-	-	-	-	mm	mm	Calcul.	Corrig.	%	mm
0,5	0,63	0,025	-	124	163	17,2			45
1,0	1,27	0,050	-	238	321	33,8			79
1,5	1,90	0,075	-	357	447	47,1			96
2,0	2,54	0,100	70,31	438	569	60,0	60,0	85,3	128
3,0	3,81	0,150	-	549	765	80,6			178
4,0	5,08	0,200	105,46	632	917	96,7	96,7	91,6	198
6,0	7,62	0,300	-	712	1050	110,7			215

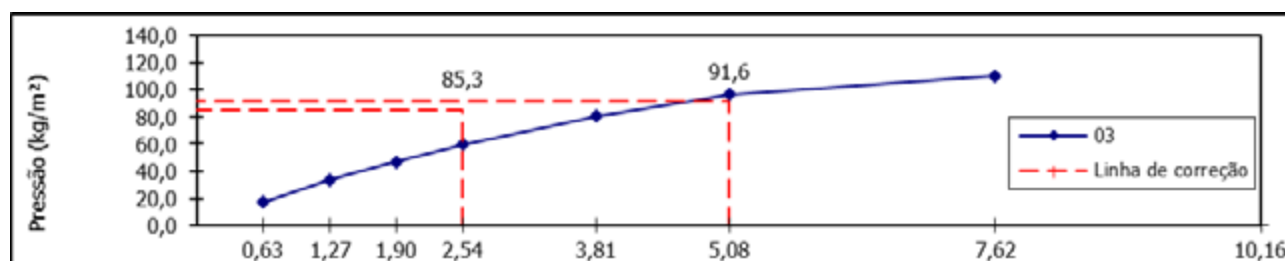


Gráfico 2 Curva de Pressão X Penetração. Fonte: Os Autores

Portanto, é possível confirmar que o material apresenta um excelente I.S.C. no valor de 91,6%, resultado acima dos 20% exigido por norma, já a expansão fica em 0,06, também menor que o valor de 1% exigido pela mesma normatização. Conforme apresentado no referencial bibliográfico a graduação granulométrica do material é de suma importância para a qualidade do serviço, desta forma foi realizado o ensaio granulométrico, os resultados são os que seguem abaixo.



DOI: 10.29327/1430212.49-58

ESTUDO DE CASO:

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA MANUTENÇÃO DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA NA MALHA DA 26ª UNIDADE REGIONAL DO DER/MG

Tabela 6 - Peneiramento grosso. Fonte: Os Autores

PENEIRAMENTO GROSSO					
Peneiras			Peso da amostra seca		% que passa da Amostra Total
PEN	N.º	mm	Retido	Passado	
1	2"	50,8	0,00	1935,1	100,0
2	1 1/2"	38,1	76,30	1858,8	96,1
3	1"	25,4	55,9	1803,0	93,2
4	3/4"	19,1	0,0	1803,0	100,0
5	3/8"	9,5	130,6	1672,4	86,4
6	N.º 4	4,8	261,7	1410,7	72,9
7	N.º 10	2,0	209,3	1201,4	62,1

Tabela 7 - Peneiramento fino. Fonte: Os Autores

PENEIRAMENTO FINO						
PESO DA AMOSTRA PARCIAL ÚMIDA					200,0	g
PESO DA AMOSTRA PARCIAL SECA					189,8	g
Peneiras			Peso da amostra seca		% que passa da Amostra Parcial	% que passa da Amostra Total
PEN	N.º	mm	Retido	Passado		
	N.º 40	0,42	64,1	125,7	66,2	41,1
	N.º 200	0,074	61,8	63,9	33,7	20,9



Figura 2 - Pista após a aplicação do material. Fonte: Os Autores



Samuel Passos Ribeiro Rodrigues e Silva,
Érica Francisca de Paula Araújo,
Vinicius Vieira Sousa,
Elziane Rezende Ferreira Magri

Tabela 8 - Tabela comparativa dos valores de aplicação, Estéril X Cascalho. Fonte: Os Autores

Código	Descrição do Serviço	Unid.	Qtde.	Preço Unit.	Preço Total
Estéril					
RO-41388	Encascalhamento (Execução, incluindo escavação, carga e descarga, umedecimento e espalhamento do material)	m3	900,00	R\$ 10,30	R\$ 9.270,00
RO-43246	Conformação do leito estradal, inclusive umedecimento	ha	0,90	R\$ 855,66	R\$ 770,09
RO-48091	Transporte de material de qualquer natureza para contratos de conservação rodoviária	t*Km	9.000,00	R\$ 1,28	R\$ 11.520,00
Cascalho					
RO-41388	Encascalhamento (Execução, incluindo escavação, carga e descarga, umedecimento e espalhamento do material)	m3	900,00	R\$ 10,30	R\$ 9.270,00
RO-43246	Conformação do leito estradal, inclusive umedecimento	ha	0,90	R\$ 855,66	R\$ 770,09
RO-41368	Transporte de material de qualquer natureza para contratos de conservação rodoviária	m3*Km	9.000,00	R\$ 1,28	R\$ 11.520,00
Local	Indenização de Jazida	m3	900,00	R\$ 8,00	R\$ 7.200,00
Valor total com Estéril					R\$ 21.560,09
Valor total com cascalho					R\$ 28.760,09
Diferença para o uso de Estéril					R\$ 7.200,00

Conforme pode ser observado no ensaio granulométrico a porcentagem fina do material, ou seja, a passante na peneira N° 10, apresenta uma porcentagem maior que algumas das bibliografias estudadas para a realização deste trabalho. Como pode ser visto pelos valores indicados pelos autores Skorseth & Selim (2000). Uma vez que a peneira n° 40 apresenta uma porcentagem total que passa de 41,1% enquanto os autores definiram um valor máximo de 35%, já para a peneira n° 200 a porcentagem passante máxima definida pelos autores é de 15%, contudo o material apresenta a porcentagem passante de 20,9%, logo trata-se de um material com uma intensa presença de finos. Os autores ainda apresentam a importância para o Índice de Plasticidade do material, desta forma foi executado o ensaio dos Limites de Atterberg, através dele obteve-se o valor do Limite de Liquidez de 29,2%, foi encontrado também um Índice de Plasticidade de 18,1%, o que corresponde a um Índice de Plasticidade de 11,1%. Desta forma é possível observar que o IP encontrado é bem próximo dos limites estabelecidos pela bibliografia. Vale destacar, conforme pode ser visto na tabela N° 8 que o valor para aplicação do material em um trecho de 1000 metros apresenta um valor de aplicação 25% menor do que a aplicação de cascalho. Com isso, apesar dos valores altos de finos e IP o material foi aplicado na pista, uma vez que apresentava valores satisfatórios de I.S.C., conforme pode ser observado na figura 2. Além de apresentar um valor de aplicação com maior viabilidade que o cascalho comercial, com a aplicação foi possível observar seu comportamento quando exposto ao tráfego e com isso constatar que o material apresenta um comportamento satisfatório e pode ser utilizado para manutenções em estradas não pavimentadas.



[DOI: 10.29327/1430212.49-58](https://doi.org/10.29327/1430212.49-58)

ESTUDO DE CASO:

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA MANUTENÇÃO DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA NA MALHA DA 26ª UNIDADE REGIONAL DO DER/MG

CONCLUSÃO

A atividade extrativa de minério definitivamente apresenta uma intensa importância no desenvolvimento econômico do país, portanto trabalhar para torná-la mais sustentável é de imenso valor. Tendo em vista o alto volume de resíduos sólidos que esta atividade produz foi realizado estudo de forma a entender o potencial de utilização destes resíduos na manutenção de estradas não pavimentadas. Foi possível observar que o material apresenta características interessantes, no que diz respeito ao seu Índice de Suporte Califórnia e a suas taxas de expansão. Portanto capaz de aguentar de forma satisfatória as demandas de carga exigidas pelo tráfego de uma rodovia não pavimentada uma vez que estes valores estão acima do recomendado por norma.

Faz-se necessário notar que sua caracterização granulométrica aponta para um material com alta presença de finos, fator resultante da configuração de peneiras usadas pela empresa para obtenção dos produtos comercializados. Isto faz com que o material não se encaixe na faixa granulométrica proposta por Skorseth & Selim (2000), contudo vale destacar que o material se encontra dentro da Faixa D, proposta pelo DNIT para o serviço de base estabilizada granulometricamente, o que capacita a utilização do material para obras de infraestrutura rodoviária. Vale notar que o material foi devidamente utilizado para manutenção da rodovia LMG658 e através dele foram obtidos resultados satisfatórios. Portanto através do exposto é possível concluir que a utilização de estêreis de mineração da calcário para uso agrícola é perfeitamente viável em obras de infraestrutura, se mostrando como uma opção economicamente vantajosa além de ser sustentável e benéfica ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: 2016** - Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: 2016** - Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895/2016 - Solo - Índice de Suporte Califórnia - Método de Ensáio**. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

DER-MG - DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES E ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS. **Boletim Rodoviário**. Belo Horizonte: DER-MG, 2020.

DER-MG - DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES E ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS. **Tabela Referencial de Custos**. Belo Horizonte: DER-MG, 2022.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT 448/2023 - ES - Terraplenagem - Revestimento Primário - Especificação de Serviço**. Brasília: DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, 2023.



Samuel Passos Ribeiro Rodrigues e Silva,
Érica Francisca de Paula Araújo,
Vinicius Vieira Sousa,
Elziane Rezende Ferreira Magri

FARIAS, C. E. G.; COELHO, J. M. **Mineração e Meio Ambiente no Brasil**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília. 2002.

GARCIA, P. R.; GARCIA, G. F.; RIBEIRO, E. L. Utilização de resíduos de construção e demolição como revestimento. **Revista Brasileira de Ciência Tecnologia e Inovação**, Uberaba, MG, 2016. 43 -56.

MARINHESKI, V. A Erosão em Estradas não Pavimentadas na Bacia do Rio do Atalho em Cruz Machado - PR. **Boletim de Geografia**, v. 35, n. 2, p. 117-127, 2017.

MEDEIROS, K. P. M. D. **Estudo do uso da escória siderúrgica de alto forno e estéril de mineração como alternativa de revestimento primário em estradas não pavimentadas**. Belo Horizonte, MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

REZENDE, V. L. A MINERAÇÃO EM MINAS GERAIS: UMA ANÁLISE DE SUA EXPANSÃO E OS IMPACTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS CAUSADOS POR DÉCADAS DE EXPLORAÇÃO. **Sociedade & Natureza: Editora da Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, MG, Dezembro 2016.

SÁ, T. S. W. et al. UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS. **6º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil**, Belém, 2019. 495-509.

SÁ, T. S. W. et al. USO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS: UM REFERENCIAL TEÓRICO. **QUALIDADE E SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL**, 2021. 152-172.

SANTOS, E. G. D. et al. Recuperação ambiental na disposição de estéril em mineração de calcário. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria , 2015.

SKORSETH, K.; ALI A. SELIM. **Gravel Roads Maintenance and Design Manual**. South Dakota: South Dakota Local Transportation Program – SD LTAP, US Department of Transportation, Federal Highway Administration - FHWA, 2000.

SKORSETH, K.; REID, R.; HEIBERGER, K. **Gravel Roads: Construction and Maintenance Guide**. South Dakota: U.S Department of Transportation, Federal Highway Administration - FHWA, 2015.



UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA SCHEELITA EM COMPOSIÇÕES ASFÁLTICAS

Francisco das Chagas da Costa Filho¹; Enio Fernandes Amorim²; Maria Del Pilar Durante³ & David Cavalcante da Silva²

RESUMO

Os setores da mineração e da construção civil são responsáveis por uma parcela significativa do crescimento econômico do país. Porém, assim como todas as atividades humanas, os referidos setores são fontes de grandes impactos ambientais. Em se tratando dos impactos oriundos da mineração citam-se como exemplos, no âmbito econômico, a geração de empregos, o desenvolvimento do local de produção e a injeção de produtos no mercado; e na vertente ambiental, os decorrentes da extração excessiva de matéria-prima e da disposição incorreta dos resíduos produzidos pelo beneficiamento, assim como a diminuição da qualidade da água superficial e subterrânea, do solo, modificação da paisagem e poluição do ar. Baseado neste contexto, o presente estudo avaliou a viabilidade técnica do uso do resíduo do beneficiamento da scheelita proveniente da Mina Brejuí, Currais Novos - RN, na composição de concretos asfálticos, em substituição ao agregado miúdo natural. Para isto, realizaram-se ensaios de caracterização física, química e mineralógica dos materiais, além de dosagens Marshall em composições de concretos asfálticos, tomando-se por base as normas brasileiras vigentes. A partir do programa experimental executado, pode-se verificar que o resíduo se apresentou tecnicamente viável para ser utilizado in natura como agregado miúdo artificial, demonstrando bom desempenho com relação aos parâmetros volumétricos e a estabilidade Marshall. É oportuno destacar que o traço de melhor desempenho foi constituído de 15% de brita 1, 35% de brita 0, 40% de pó de pedra, 6% de resíduo de scheelita e 4% de cimento Portland. Com relação a estabilidade, todos os traços com agregados naturais alcançaram valores de estabilidade acima de 500 kgf.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto Asfáltico; Scheelita; Resíduo de Mineração; Mina Brejuí.

ABSTRACT

The mining and civil construction sectors are responsible for a significant portion of the country's economic growth. However, like all human activities, these sectors are sources of major environmental impacts. When it comes to the impacts arising from mining, examples include, in the economic sphere, the generation of jobs, the development of the production site and the injection of products into the market; and on the environmental side, those resulting from the excessive extraction of raw materials and the incorrect disposal of waste produced by processing, as well as the reduction in the quality of surface and underground water, soil, modification of the landscape and air pollution. Based on this context, the present study evaluated the technical feasibility of using scheelite processing residue from the Brejuí Mine, Currais Novos - RN, in the composition of asphalt concrete, replacing natural fine aggregate. To this end, physical, chemical and mineralogical characterization tests of the materials were conducted, in addition to Marshall dosages in asphalt concrete compositions, based on current Brazilian standards. From the experimental program conducted, the residue was technically viable to be used in natura as artificial fine aggregate, demonstrating good performance in relation to volumetric parameters and Marshall stability. It is worth noting that the best performing mixture consisted of 15% crushed stone 1, 35% crushed stone 0, 40% stone dust, 6% scheelite residue and 4% Portland cement. Regarding stability, all mixes with natural aggregates reached stability values above five hundred kgf.

KEY WORDS: Asphalt Concrete; Scheelite; Mining Residue; Brejuí Mine.

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco, e-mail: filhoshalom@hotmail.com

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, e-mail: enio_amorim@yahoo.com.br; david.cavalcante@escolar.ifrn.edu.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, e-mail: pilarduranteingunza@gmail.com



INTRODUÇÃO

A construção civil é responsável por fatores semelhantes ao segmento ligado a área de mineração e requer uma atenção mitigadora no uso dos bens naturais, uma vez que esses bens se constitui de materiais finitos. Neste sentido, devido a diminuição das reservas dos recursos naturais e ao acúmulo de resíduos no meio ambiente, vários estudos estão utilizando os produtos residuais de diversos setores para compor materiais alternativos no setor da construção civil. A seguir, são apresentados alguns estudos, com fins voltados para o aproveitamento de resíduos na área de pavimentação.

Kato (2017) aplicou o resíduo da mineração do cobre sulfetado em misturas asfálticas visando a melhoria do desempenho frente as propriedades Marshall. Foram elaboradas misturas com as seguintes dosagens: piloto (75% de seixo + 25% de areia); 10% rejeito (75% de seixo + 15% areia + 10% de rejeito); 20% rejeito (75% de seixo + 5% areia + 20% de rejeito) e 25% rejeito (75% de seixo + 25% de rejeito). Com a realização dos ensaios, verificou-se uma melhoria nas características Marshall, com uma redução do teor de CAP em torno de 8% para a dosagem ótima com 7,73% de resíduo, a 4% de teor de vazios, quando comparado a dosagem sem resíduo. Segundo o autor, a redução do teor de ligante foi decorrente das características granulométricas do resíduo, que possibilitou um maior fechamento dos vazios da mistura; o que consequentemente, aumenta a resistência e durabilidade frente a agentes agressivos.

Gautam *et al.* (2018) estudaram misturas asfálticas com a incorporação de resíduo de mineração de pedra calcária como agregado em concretos asfálticos e macadame betuminoso denso. Foram realizadas dez misturas diferentes com a incorporação do agregado artificial, variando em um intervalo de 25% em peso, de 0 a 100% para as misturas de concreto asfáltico e macadame betuminoso denso. Em relação a estabilidade Marshall, todas as misturas de concreto asfáltico atingiram valores superiores a 9 kN (variaram de 10,35 kN para 100% de substituição a 12,08 kN sem substituição). As estabilidades das misturas com macadame betuminoso denso, na composição com 100% de substituição resultou em valores abaixo de 9 kN.

Diante dos bons resultados apresentados em diversos estudos com a utilização de resíduos em misturas asfálticas, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação da viabilidade técnica do uso de resíduo oriundo do beneficiamento da scheelita na composição de concretos asfálticos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Características dos materiais envolvidos

O resíduo mineral empregado neste estudo é constituído de uma fração grossa de granulometria semelhante a uma areia natural, com diâmetros variando de 0,06 mm a 2 mm, coletado nas pilhas de rejeito da Mineração Tomaz Salustino S/A (Mina Brejuí) em Currais Novos/RN, Brasil. De acordo com Medeiros *et al.* (2010) a scheelita encontrada na região do Seridó do Estado do Rio Grande do Norte, é representante da Província Scheelitífera da Borborema, a mais importante reserva do minério no Brasil. Entre os municípios contidos nesta região, destaca-se Currais Novos - RN, que tem uma parcela da sua economia baseada na extração de recursos minerais; em especial, a scheelita, nas minas e garimpos, predominantemente em rochas metamórficas do Seridó (DANTAS; FERREIRA, 2010). A Figura 1 apresenta detalhes das pilhas de resíduo dispostas no entorno da mineração em Currais Novos/RN.



DOI: 10.29327/1430212.49-22

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA SCHEELITA
EM COMPOSIÇÕES ASFÁLTICAS

Figura 1. Entorno da Mina Brejuí: detalhes das pilhas de resíduos (COSTA, 2017)

Os demais agregados naturais foram obtidos com a empresa Britador Caicó, no município de Caicó - RN. Quanto ao ligante asfáltico, utilizou-se o CAP 50/70 adquirido junto a empresa TCPAV Ltda, com sede em Natal/RN. Os detalhes pertinentes a caracterização física dos materiais envolvidos encontra-se detalhados por meio da Tabela 1. A Figura 2 apresenta as curvas de distribuição granulométrica dos materiais.

Tabela 1. Características dos agregados utilizados na pesquisa (COSTA, 2017)

Parâmetros	Resíduo	Areia	Cimento
Dimensão Máxima Característica	2,4 mm	2,4 mm	0,075 mm
Módulo de Finura	2,9	2,0	0,012
Massa específica	2,98 g/cm ³	2,62 g/cm ³	2,82 g/cm ³
Parâmetros	Pó de pedra	Brita 0	Brita 1
Dimensão Máxima Característica	9,5 mm	9,5 mm	25 mm
% de finos	1,02%	-	-
Massa específica	2,78 g/cm ³	2,58 g/cm ³	2,61 g/cm ³
Absorção	-	2,29%	2,15%
Abrasão Los Angeles	-	-	62,51%
Índice de Forma	-	-	0,91



FRANCISCO DAS CHAGAS DA COSTA FILHO,
ENIO FERNANDES AMORIM,
MARIA DEL PILAR DURANTE,
DAVID CAVALCANTE DA SILVA

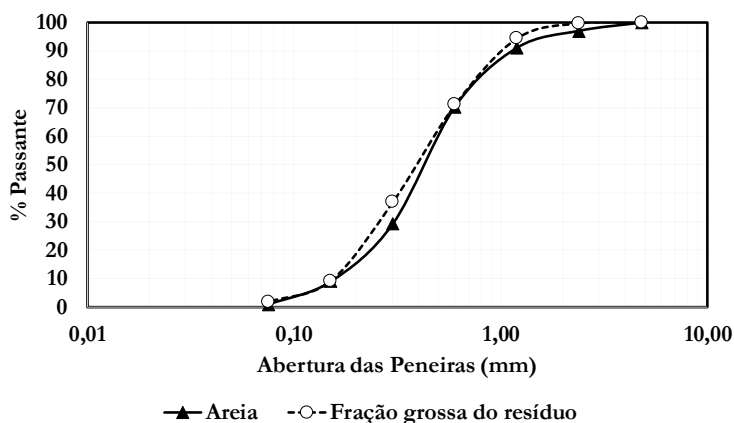


Figura 2. Análise granulométrica das areias natural e artificial (COSTA, 2017)

As características mineralógicas do resíduo ilustram que esse material possui picos discretos com a presença de calcita e do quartzo, como pode ser observado na Figura 3. Além disso, observa-se a existência da enstatita fêrrica, típica da composição da scheelita.

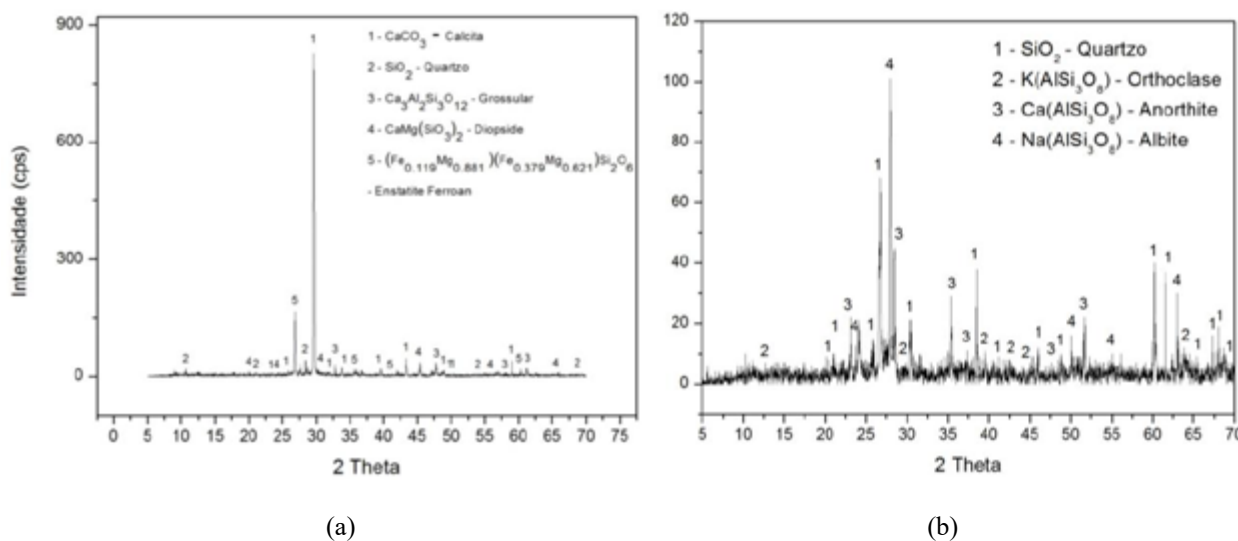


Figura 3. (a) Difractograma do resíduo da Scheelita / (b) Difractograma da areia natural (COSTA, 2017)

Com a Fluorescência de Raios - X (Tabela 2), percebe-se que os agregados miúdos natural e artificial possuem como principais óxidos: CaO, SiO₂, Fe₂O₃, ambos materiais com porcentagens de tais óxidos bem similares. Vale salientar que o alto teor de CaO (43,27%) e a presença de MgO (3,78%) observados na composição do resíduo podem gerar problemas devido ao provável poder expansivo. Tal situação foi mencionada por Fernandes (2011) ao trabalhar com escória de aciaria, onde os autores mencionavam a respeito da expansão comumente causada pela presença desses óxidos. Paiva (2013) realizou FRX de areia natural, e constatou que o dióxido de silício e óxido de alumínio, juntamente apresentavam 90% da composição.



DOI: 10.29327/1430212.49-22

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA SCHEELITA
EM COMPOSIÇÕES ASFÁLTICAS

Tabela 2. Composição química por FRX dos agregados miúdos (COSTA, 2017)

Resíduo				Areia Natural			
Óxidos	%	Óxidos	%	Óxidos	%	Óxidos	%
CaO	43,27	WO ₃	0,54	SiO ₂	48,20	MgO	1,30
SiO ₂	24,98	TiO ₂	0,40	Al ₂ O ₃	16,77	TiO ₂	1,14
Fe ₂ O ₃	13,27	MoO ₃	0,32	Fe ₂ O ₃	11,97	BaO	0,39
Al ₂ O ₃	9,65	BaO	0,21	CaO	5,78	P ₂ O ₅	0,24
MgO	3,78	ZrO ₂	0,21	ZrO ₂	5,55	MnO	0,18
SrO	1,47	Rb ₂ O	0,06	K ₂ O	4,15	Rb ₂ O	0,17
K ₂ O	1,01	ZnO	0,06	Na ₂ O	2,03	Y ₂ O ₃	0,14
MnO	0,79			SrO	1,95	ZnO	0,04

Programa experimental

Para analisar a incorporação do resíduo em concretos asfálticos como substituto da areia natural, analisou-se os parâmetros volumétricos e a estabilidade Marshall, regido pela norma do DNIT, ME-031 (DNIT, 2006). Optou-se em deixar pelo menos 45% dos materiais representados pelos agregados graúdos, pois em uma mistura betuminosa como o concreto asfáltico, a capacidade de suporte é fornecida com maior efetividade pelo agregado graúdo. Além disso, optou-se em fixar a quantidade de fíler em 4% para não gerar problemas como o preenchimento excessivo de vazios, o que geraria um pavimento mais rígido. As porcentagens de agregado miúdo variaram de 6% a 22% do total dos constituintes minerais, em virtude do melhor enquadramento granulométrico nos limites da curva C da norma 031/2006 do DNIT e a maior proximidade das curvas ideais. A Tabela 3 ilustra detalhes empregados nos traços em estudo:

Tabela 3. Estudo das Misturas Asfálticas - Dosagem Marshall DNIT - ME 031/2006 (COSTA, 2017)

Quantidade		Material
Amostras Padrão (Sem Resíduos)	Amostras com Resíduos de Scheelita	% de Substituição Prevista (Fração Graúda de Scheelita)
12	12	6%
12	12	8%
12	12	10%
12	12	12%
12	12	14%



As composições dos traços utilizados nesta pesquisa são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Composições dos traços de CBUQ (COSTA, 2017)

Traços com agregados naturais					
Materiais	1TP	2TP	3TP	4TP	5TP
Brita 1	15%	15%	15%	15%	15%
Brita 0	35%	35%	35%	31%	30%
Pó de pedra	40%	36%	32%	32%	29%
Areia	6%	10%	14%	18%	22%
Cimento	4%	4%	4%	4%	4%
Total	100%	100%	100%	100%	100%
Traços com a incorporação do resíduo					
Materiais	1TR	2TR	3TR	4TR	5TR
Brita 1	15%	15%	15%	15%	15%
Brita 0	35%	35%	35%	31%	30%
Pó de pedra	40%	36%	32%	32%	29%
Resíduo	6%	10%	14%	18%	22%
Cimento	4%	4%	4%	4%	4%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo como foco as estabilidades alcançadas e os parâmetros volumétricos obtidos nos corpos de provas constituídos pelas composições de agregados naturais e pelo uso do resíduo mineral oriundo do beneficiamento da Scheelita, a Figura 4 apresenta os resultados obtidos neste estudo. Diante desse contexto, é oportuno destacar que os estudos realizados por Kato (2017), empregando resíduos de mineração de cobre sulfetado e Gautam *et. al.* (2018), utilizando resíduos de mineração de pedra calcárea, apresentou comportamentos semelhantes ao alcançados neste estudo, para as composições evidenciadas nas misturas asfálticas avaliadas.



DOI: 10.29327/1430212.49-22

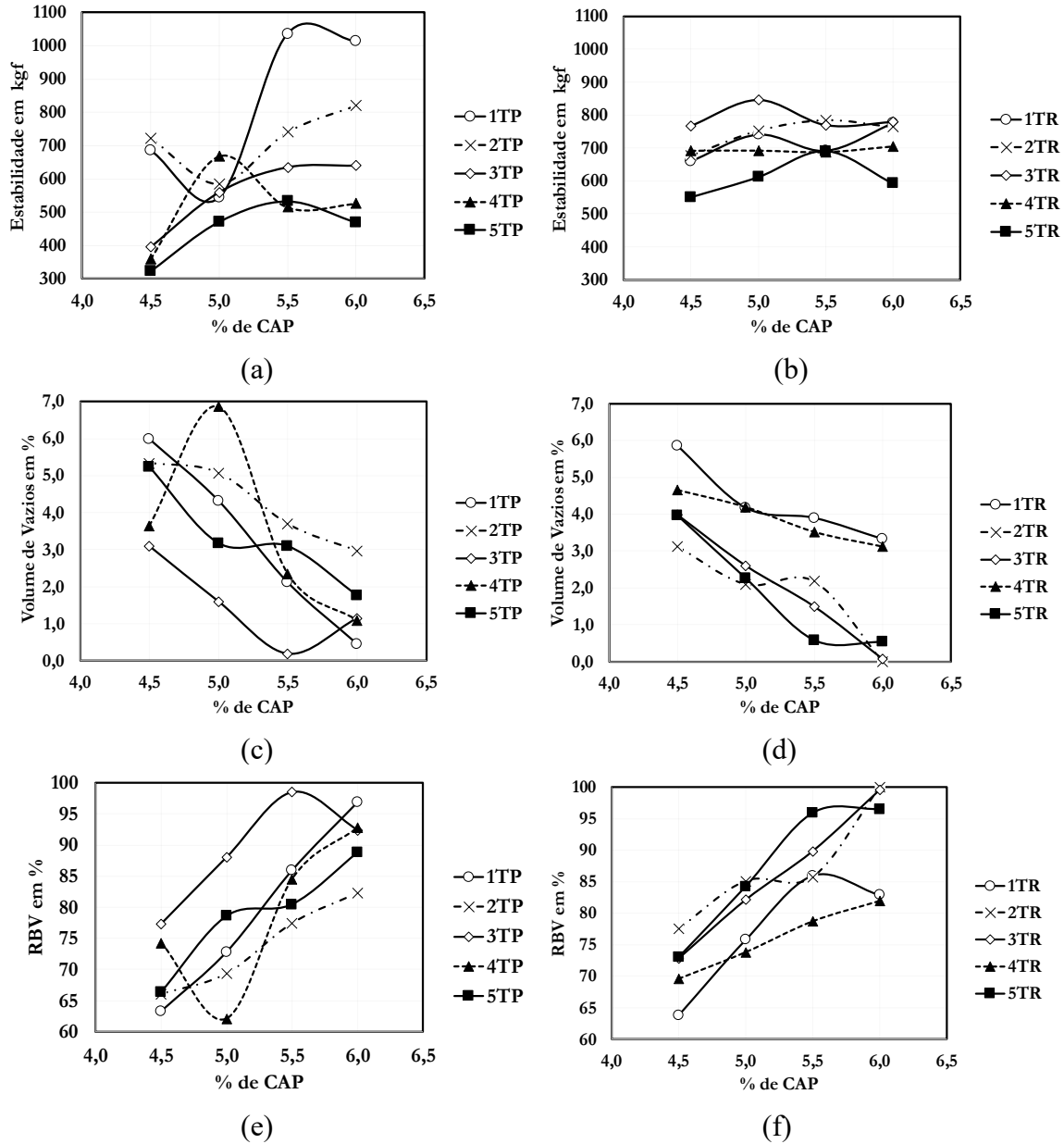
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA SCHEELITA
EM COMPOSIÇÕES ASFÁLTICAS

Figura 4. (a) Estabilidade Marshall x CAP - agregados naturais / (b) Estabilidade Marshall x CAP - resíduo / (c) Volume de vazios x CAP - agregados naturais / (d) Volume de vazios x CAP - resíduo / (e) Relação betume/vazios x CAP - agregados naturais / (f) Relação betume/vazios x CAP - resíduo. (COSTA,2017).

Na Figura 4 (a) observa-se que os maiores valores de estabilidade alcançados foram atingidos para os corpos de prova do 1TP, possivelmente por conter menor quantidade de areia em sua constituição, já que a porcentagem de agregado miúdo do primeiro traço (1TP) foi de 6%. Contrária a essa situação, os valores atingidos pelo traço 5TP com 22% de areia foram inferiores ao traço 1TP, apresentando uma menor capacidade de suporte devido à redução significativa da quantidade de agregados graúdos e intermediário, passando de 35% de brita 0 no traço 1TP para 30% no traço



5TP, e 40% de pó de pedra no primeiro traço para 29% no 5TP. Observa-se também que em todos os traços de CBUQ, em seu ponto de pico, foram obtidos valores de estabilidade acima de 500 kgf, atendendo ao requisito recomendado pela norma 031/2006 do DNIT (2006) para camadas de rolamento de pavimentos asfálticos. Para os traços constituídos com o resíduo na condição de agregado miúdo artificial, observou-se pela Figura 4 (b) que as curvas de estabilidade versus porcentagem de CAP não apresentaram um comportamento muito disperso como ocorrido com os agregados naturais. Analisando a viabilidade da utilização do resíduo para as dosagens analisadas somente pela estabilidade, observou-se que todos os traços atingiram valores de acima do recomendado pelo DNIT (2006), 500 kgf.

Na Figura 4 (c) é possível perceber que somente o traço 3TP não alcançou o limite superior para o %Vv, igual a 5%, determinados pela norma do DNIT 031/06 (DNIT, 2006). Isto provavelmente ocorreu devido a maior presença de material com graduação miúda na composição quando comparado com os traços 1TP e 2TP, e conseqüentemente maior preenchimento dos vazios. Este fato se torna prejudicial para camadas de rolamento, pois quando o pavimento for solicitado, não terá vazios suficientes para se deformar e aliviar as tensões, ou seja, se comportará de forma rígida, podendo gerar fissuras, e prejudicar a durabilidade do mesmo.

Analisando as curvas geradas pelos corpos de provas com a substituição do agregado miúdo pelo resíduo na Figura 4 (d), é perceptível que o traço que possui menor quantidade do resíduo (1TR), foi o que alcançou as maiores porcentagens de volume de vazios, e isto provavelmente foi gerado pela menor quantidade de material miúdo para preenchimento de vazios dos corpos de prova. Além disso, observou-se que o valor de %Vv alcançado pelo 1TR a 4,5% de CAP foi muito próximo ao valor atingido pelo 1TP na mesma porcentagem de ligante. Também se percebeu que o 2TR apresentou somente o limite mínimo do DNIT (2006), o que possivelmente geraria um revestimento com comportamento mais rígido do que os outros que se apresentaram dentro da faixa de $3,0\% \leq \%Vv \leq 5,0\%$. Para esse traço específico, percebeu-se que os corpos de prova de 6,0% de CAP tenderam 0% de volume de vazios, isso pode ter ocorrido por uma compactação mais efetiva, por um bom empacotamento dos grãos na mistura, além da massa específica aparente da mistura compactada ter sido semelhante a densidade máxima teórica; tal comportamento também foi observado no 3TR.

Comparando os resultados do 3TR com o traço padrão 3TP (Figura 4 (c)), observou-se que os corpos de prova com resíduo obtiveram melhores resultados, visto que tenderam a 4,0% de %Vv, enquanto os corpos de prova com a areia natural atingiram como valor máximo 3,11%, também a 4,5% de CAP. Com o aumento da porcentagem do resíduo, a partir do segundo traço (Figura 4 (d)), com exceção do 4TR, observou-se uma tendência a baixos valores de %Vv, próximos a valores nulos, devido a um maior preenchimento dos vazios.

Analisando a relação betume vazios - RBV, percebeu-se pela Figura 4 (e) que todas as curvas apresentaram uma tendência ao aumento da %RBV com o aumento do teor de ligante, com exceção para o traço 3TP a 5,5% de CAP e 4TP a 5,0% de CAP. Também foi observado que o traço 3TP a 5,5% de CAP alcançou %RBV próximo a 100%; tal fato pode ter ocorrido por uma compactação menos eficiente, deixando mais vazios para serem preenchidos com betume, além da utilização de agregados menos porosos e mais angulares, possibilitando mais vazios entre os agregados e menos absorção pelos constituintes minerais, de modo a maximizar o valor de RBV. Ainda analisando a Figura 4 (e), também é perceptível que os menores valores de RBV se deu na dosagem mais baixa de ligante, 4,5% de CAP, com exceção do 4TP, que teve seu menor valor a 5,0% de ligante asfáltico.



DOI: 10.29327/1430212.49-22

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA SCHEELITA
EM COMPOSIÇÕES ASFÁLTICAS

De forma análoga, observou-se nas curvas de %RBV versus %CAP que os maiores valores de %RBV se deu em dosagens mais altas, a 5,5% e 6,0% de CAP; tal característica pode ter ocorrido devido a maior quantidade de ligante na mistura asfáltica ou menores valores de %Vv, ocasionado por uma compactação mais eficiente ou pela utilização de agregados menos angulosos. Para os valores de RBV obtidos, infere-se que as curvas dos traços estudados ultrapassaram o limite superior recomendado pelo DNIT (82%), fato este relevante, porque altos valores de %RBV como os alcançados pelo primeiro traço com agregados naturais (98,83%) podem gerar problemas ao revestimento; pois, segundo Bernucci *et al.* (2006), o concreto asfáltico é muito sensível a variação do teor de ligante, e estes, se forem utilizados em altas doses, podem ocasionar deformações permanentes por fluência e/ou exsudação.

Analisando as curvas de %RBV versus %CAP dos traços constituídos por agregado miúdo artificial (Figura 4 (f)), percebeu-se a mesma tendência apresentada pelas curvas de %RBV x %CAP dos corpos de prova com agregados naturais, ou seja, a um aumento da porcentagem de RBV com o aumento da dosagem de ligante, sendo os maiores valores de %RBV a 6,0% de CAP, com exceção do traço 1TR, a 5,5% de CAP. Ainda no tocante aos parâmetros volumétricos, analisou-se qual seria a influência da estabilidade versus a porcentagem de volume de vazios e a relação betume/vazios. A seguir a Figura 5 ilustra detalhes dos resultados obtidos.

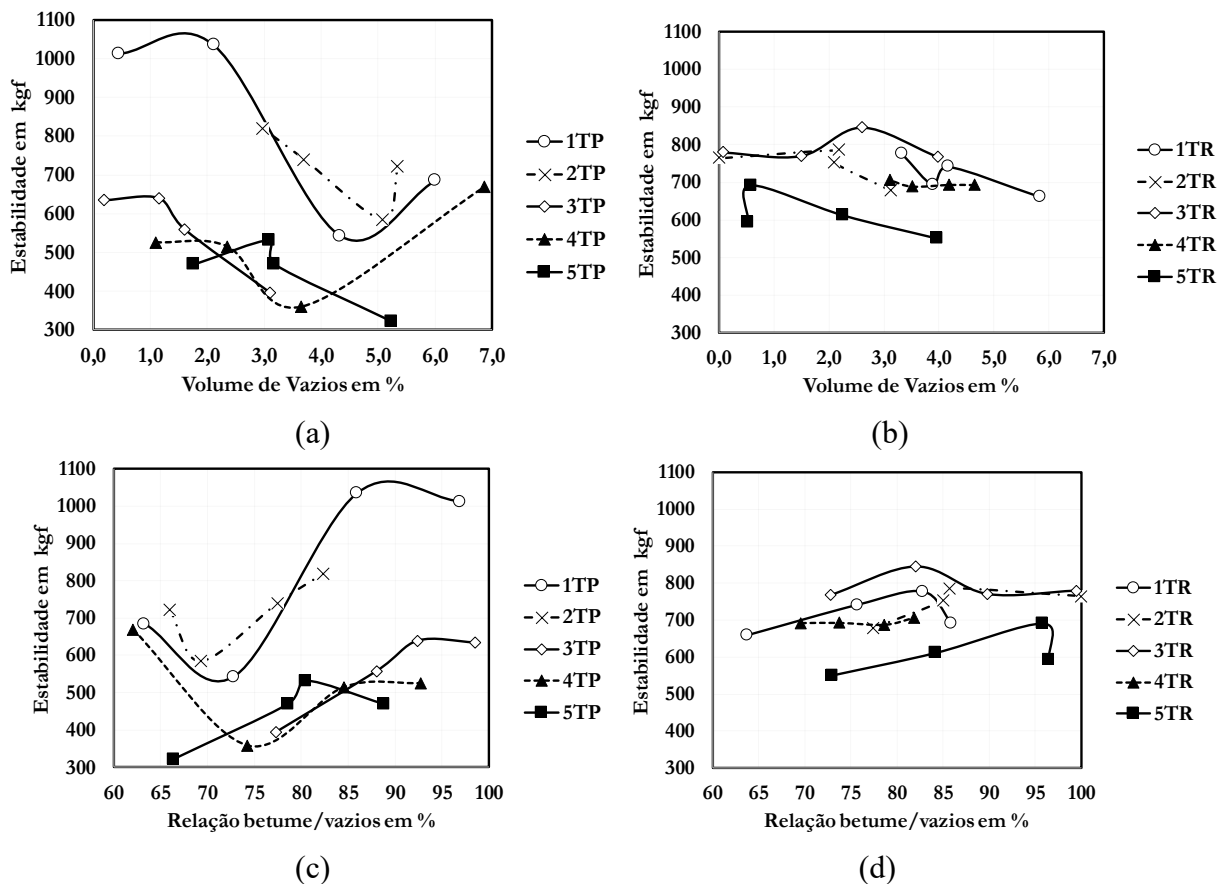


Figura 5. (a) Estabilidade versus %Vv - agregados naturais / (b) Estabilidade versus %Vv - resíduo / (c) Estabilidade versus %RBV - agregados naturais / (d) Estabilidade versus %RBV - resíduo. (COSTA, 2017).



A Figura 5 (a) descreve o comportamento de curvas que relaciona a estabilidade com a porcentagem de volume de vazios dos corpos de provas contendo agregados naturais, onde, observa-se que para alguns traços analisados como o 1TP, 2TP, 3TP, e, parcialmente, o 4TP e 5TP, verificam-se uma tendência a valores maiores de estabilidade em baixas porcentagens de volume de vazios e um decréscimo acentuado de estabilidade com o aumento da %Vv. Tal característica exposta pela Figura 4 (a), se dá pelo fato de que quanto menor o número de vazios em um corpo de prova, mais resistente será o mesmo; porém, com maior facilidade de sofrer deformações como trincas, visto que não se comportará adequadamente como um pavimento flexível, pois não terá vazios suficiente para permitir a ocorrência de deformações elásticas quando o pavimento for solicitado por carregamentos externos. Além disso, contribuem para este comportamento, o tipo, o tamanho e a angulosidade dos grãos da mistura. Com os dados expostos, pode-se perceber que os traços que obedecem às recomendações da norma do DNIT 031/2006 (2006) com relação a estabilidade e a %Vv, de no mínimo 500 kgf e $3,0\% \leq \%Vv \leq 5,0\%$, respectivamente, foram: 1TP, 2TP, e 5TP, ressalvando que o 5TP não atingiu os 4,0% para a determinação do teor ótimo de ligante acima dos 500 kgf; para tais traços, analisando somente a estabilidade acima de 500 kgf e %Vv de 4,0%, o mais viável a produção de pavimentos seria o 2TR, visto que oferece maior estabilidade as cargas solicitantes e %Vv adequado.

Outra relação muito importante é a interação entre a estabilidade e a %RBV, visto que se a quantidade de ligante em uma mistura asfálticas não for bem dimensionada, a mesma poderá estar susceptível a diversos problemas. A Figura 5 (c) mostra as curvas que relaciona a estabilidade com a %RBV dos corpos de provas com agregados naturais. Com a referida figura, percebeu-se que os possíveis traços que poderão ter problemas devido ao excesso de ligante nos vazios são: 1TP, 3TP, 4TP e 5TP; isto com base nas recomendações da norma do DNIT 031/2006 (2006), onde a relação betume/vazios deve estar entre o intervalo 75% - 82% para camadas de rolamento. Diante desses resultados, os pavimentos projetados com tais traços, poderão sofrer deformações permanentes por fluência e/ou exsudação caso não seja levando em consideração a dosagem ótima de ligante. A mesma análise pode ser feita para baixas porcentagens de ligante nos corpos de prova; os traços 1TP, 2TP, 4TP e 5TP poderão ter a durabilidade afetada e conseqüentemente serão susceptíveis a trincas. Vale salientar que tais análises estão sendo feitas para trechos específicos do gráfico.

Tendo em vista a determinação dos teores ótimos de ligante, calculou-se a média dos valores obtidos nas dosagens referentes a estabilidade máxima, ao maior valor da massa específica aparente da mistura compactada, e aos valores médios dos limites da %Vv e %RBV. Para os traços com agregados naturais em ordem crescente, observou-se consecutivamente os seguintes teores ótimos de ligante: 5,45%, 5,74%, 5,15%, 5,23% e 5,06%; sendo a maior dosagem de 5,74% e a menor 5,06% relacionada consecutivamente aos traços 2TR e 5TR. Para os traços com a incorporação do resíduo, apresentaram consecutivamente em ordem crescente de traço, os seguintes valores de teores ótimos de ligantes: 5,46%, 5,16%, 5,07%, 5,27% e 5,06%, sendo o maior valor (5,46%) associado ao traço 1TR e o menor (5,06%) ao 5TR.

CONCLUSÕES

Tendo em vista a caracterização física, química e mineralógica apresentada pelos materiais e o estudo das dosagens asfálticas, pode-se listar as seguintes considerações:

O resíduo em estudo se assemelha a uma areia natural quando se analisa as suas propriedades granulométricas e minerais constituintes. A presença da calcita, neste tipo de resíduo, não acarreta



DOI: [10.29327/1430212.49-22](https://doi.org/10.29327/1430212.49-22)

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DA SCHEELITA EM COMPOSIÇÕES ASFÁLTICAS

nenhum prejuízo para efeito de quebra dos grãos. Os materiais naturais e o cimento asfáltico de petróleo apresentaram-se satisfatórios para aplicação em questão, obedecendo aos requisitos expostos nas normas pertinentes. A brita 1 obteve dimensão máxima característica de 25 mm e classificou-se como cúbica devido ao índice de forma resultar em 0,91. A Perda a abrasão de 62,51% foi superior ao recomendado pela norma 031/2006 do DNIT (2006), porém aceita, pois o material já fora utilizado em rodovias do RN apresentando desempenho satisfatório.

Com relação a estabilidade, todos os traços com agregados naturais alcançaram valores de estabilidade acima de 500 kgf, porém, deve-se verificar a dosagem ótima de ligante para atingir o desempenho e as propriedades desejadas para o pavimento projetado. Os traços contendo o resíduo como agregado miúdo apresentaram-se com boa eficiência no quesito de estabilidade, visto que todas as curvas, para as dosagens de ligantes propostos, apresentaram valores de estabilidade acima de 500 kgf, tornando-se viáveis para produção de CBUQ.

Considerando a porcentagem de volume de vazios, todos os traços apresentaram-se na faixa permitida pelo DNIT; porém, os traços 3TP, 2TR alcançaram somente o mínimo estabelecido pela norma 031/2006 do DNIT (2006). No tocante da porcentagem da relação betume vazios, todos os traços apresentaram-se viáveis para a produção de CBUQ; contudo, se faz necessário verificar a dosagem de ligante utilizada, visto que os traços 2TR, 3TR, 5TR, 3TP e 1TP alcançaram valores altos de %RBV para dosagens de CAP específicas, estando os mesmos susceptíveis a deformações por fluência e/ou exsudação.

Tendo como foco as correlações entre os parâmetros volumétricos e estabilidade, verificou-se uma tendência para o aumento de estabilidade a baixos valores de porcentagem de volume de vazios, corroborando com as observações feitas na relação entre estabilidade versus %RBV, visto que as curvas apresentaram uma tendência ao aumento de estabilidade com o aumento da %RBV, devido a ocupação dos vazios pelo ligante asfáltico.

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que para os ensaios realizados, o resíduo do beneficiamento da scheelita in natura apresentou-se viável para ser utilizada como agregado miúdo artificial em concreto betuminoso usinado a quente, para os traços analisados e expostos neste trabalho. Contudo, recomenda-se a realização de outros ensaios tecnológicos como o de adesividade por umidade induzida, módulo de resiliência, resistência a tração estática, vida de fadiga, creep estático, desgaste cântabro, simulação de tráfego em laboratório ou mesmo a aplicação de um trecho experimental, para fornecer um respaldo maior na análise do potencial técnico-econômico da aplicação do resíduo da scheelita em pavimentos asfálticos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Mineração Tomaz Salustino S/A e Britador Caicó Ltda pelo fornecimento dos materiais da pesquisa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte por todo o suporte da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DANTAS, M. E.; FERREIRA, R. V. F. (2010). **Relevo. In: PFALTZGRAFF, P. A. do S. Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Norte.** Recife: CPRM, 227f, 2010.



DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006 - ES:** Pavimentos flexíveis, concreto asfáltico, especificação de serviço. Rio de Janeiro/RJ, 2006.

FERNANDES, B. R. B. **Aproveitamento dos finos de Scheelita utilizando concentração centrífuga e lixiviação ácida.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal do Pernambuco. Recife/PE, 2011.

GAUTAM, P. K.; KALLA, P.; NAGAR, R.; AGRAWAL, R.; JETHOO, A. S. **Laboratory investigations on hot mix asphalt containing mining waste as aggregates.** Construction and Building Materials, 168, 143-152, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.115>.

GERAB, A. T. F. de S. C. **Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2014.

GODEIRO, M. L. da S.; BORGES JÚNIOR, J. P.; FERNANDES, B. R. B.; LEITE, J. Y. P. **Caracterização de pré-concentrado do rejeito de scheelita da mina Brejuí em concentrador centrífugo.** HOLOS, Ano 26, Vol. 5, 2010. ISSN 1807-1600.

KATO, R. B. **Aplicação do resíduo de mineração do cobre para melhoria do desempenho de misturas asfálticas.** Revista Eletrônica de Engenharia Civil – REEC, vol. 14, n. 1, 2017. ISSN: 2179-0612. D.O.I. 10.5216/reec.V14i1.46021.

LOBO, A. V. L.; J. S. MOTTER; L. F. R. MIRANDA. **Avaliação da utilização de agregado reciclado de concreto na fabricação de concreto betuminoso usinado a quente.** Revista Sodebras, v. 10, Nº 110, Fevereiro, 2015. ISSN 1809-3957.

MACHADO, T. G. **Estudo da adição de resíduo de scheelita em Matriz cerâmica: formulação, propriedades físicas e microestrutura.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2012.

MEDEIROS, V. C.de; NESI, J. de R.; NASCIMENTO, M. A. L. do. **Recursos Minerais. In: PFALTZGRAFF, Pedro Augusto do Santos. Geodiversidade do estado do Rio Grande do Norte.** Recife: CPRM, 2010. 227f.

PAIVA, E. H. G. **Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2013.



REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA: CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE

Murilo Miguel Narciso¹; Lisley Madeira Coelho¹; Antônio Carlos Rodrigues Guimarães¹

RESUMO

O uso de argila para produção de material pétreo por meio do aquecimento a altas temperaturas data desde os primeiros povos. Os agregados de argila calcinada apresentam temperaturas de aquecimento de 600°C a 1100°C e demonstram boas perspectivas de resistência mecânica. A utilização do Agregado Artificial de Argila Calcinada (AAAC) é benéfica por ser uma alternativa à brita em locais remotos, como o norte do Brasil, onde o transporte é caro. Com o intuito de contribuir para a investigação das propriedades físicas e a viabilidade da produção de agregados artificiais de argila calcinada, integrando rejeitos de mineração, esta pesquisa conduziu uma série de ensaios de caracterização física e mineralógica de solo arenoso, proveniente da cidade de Itacoara, Rio de Janeiro, solo argiloso, coletado na região de Dourados, Mato Grosso do Sul e rejeito de mineração de ferro, proveniente de Itabirito, região central de Minas Gerais. Os resultados destacaram a influência significativa da composição da mistura, especialmente a presença de solo arenoso e argiloso, no processo de extrusão e calcinação. Observou-se que a proporção adequada de solo argiloso favorece a trabalhabilidade do material, enquanto um alto teor de solo arenoso pode comprometer o processo. Conclui-se que é crucial considerar a mineralogia da mistura, evitando proporções excessivas de solo arenoso e rejeito para garantir as propriedades necessárias para a produção cerâmica do agregado.

PALAVRAS-CHAVE: Argila Calcinada, Rejeito de Mineração do Ferro, Agregado Artificial.

ABSTRACT

The use of clay for the production of stone material through high-temperature heating dates back to ancient civilizations. Calcined clay aggregates are subjected to temperatures ranging from 600°C to 1100°C and demonstrate promising mechanical strength. The utilization of Artificial Calcined Clay Aggregate (ACCA) proves beneficial as an alternative to gravel in remote locations, such as northern Brazil, where transportation costs are high. In order to contribute to the investigation of the physical properties and feasibility of producing artificial calcined clay aggregates by incorporating mining wastes, this research conducted a series of physical and mineralogical characterization tests on sandy soil from Itacoara, Rio de Janeiro, clayey soil from Dourados, Mato Grosso do Sul and iron mining tailings from Itabirito, central region of Minas Gerais. The results underscored the significant influence of mixture composition, particularly the presence of sandy and clayey soils, on the extrusion and calcination process. It was observed that an appropriate proportion of clayey soil enhances material workability, while a high content of sandy soil may hinder the process. Thus, it is concluded that careful consideration of the mixture's mineralogy is crucial, avoiding excessive proportions of sandy soil and mining waste to ensure the necessary properties for ceramic aggregate production.

KEY WORDS: Calcined Clay, Iron Mining Waste, Artificial Aggregate.

¹ Instituto Militar de Engenharia, IME/RJ, murilomn58@ime.eb.br; madeiralisley@gmail.com; guimaraes@ime.eb.br



INTRODUÇÃO

A utilização de argila para a produção de materiais pétreos através do aquecimento a altas temperaturas remonta aos tempos antigos, como mencionado em Gênesis 11:3. A argila é um material amplamente distribuído no mundo, barato e facilmente acessível. Ao mesmo tempo, é um material com grande diversidade em termos de composição mineralógica, o que levou a inúmeras obras dedicadas à análise da possibilidade de utilizar argilas de depósitos específicos. Portanto, é necessário investigar qual a estrutura e os argilominerais presentes por meio de caracterização mineralógica, de forma a aquecer com os parâmetros de temperatura corretos a argila, de forma a obter maior atividade pozolânica e cimentícia do material (NAWEL; MOUNIR; HEDI 2020) (TIRONI et al., 2012).

Os agregados de argila calcinada, submetidos a temperaturas de aquecimento entre 600°C e 1100°C, demonstraram na pesquisa de CABRAL (2005), por exemplo, enquadramento nas propriedades mecânicas recomendadas na bibliografia. Assim, torna-se favorável o emprego de Agregados Artificiais de Argila Calcinada (AAAC) (CABRAL, 2005).

Atualmente, destacam-se dois principais benefícios do uso de AAAC. Na região norte do Brasil, o setor da construção civil enfrenta desafios significativos, especialmente no que diz respeito ao transporte de material britado, como agregados graúdos para concreto ou para utilização em pavimentação, incluindo em camadas de bases de pavimentos rodoviários. Esta situação foi explorada por Barbosa; Marques e Guimarães (2018) no estado do Acre. A exploração de jazidas de argila para a produção de agregados emerge como uma alternativa viável e economicamente vantajosa, especialmente em áreas remotas, onde o transporte de materiais tradicionais é dispendioso. Nesse contexto, o conhecimento técnico sobre o uso de argila calcinada torna-se de grande relevância.

Além dos benefícios anteriormente mencionados, destaca-se outra vantagem significativa, especialmente diante dos crescentes incidentes envolvendo o rompimento de barragens de rejeitos no Brasil. Entre 1996 e 2005, a mineração gerou aproximadamente 2,180 bilhões de toneladas de rejeitos, com a mineração de ferro se destacando como a maior contribuinte nesse aspecto (FRIBER et al., 2023). Nesse contexto, a busca por soluções sustentáveis para a reutilização ou disposição adequada desses rejeitos torna-se crucial.

Estudos como os realizados por Cabral (2005), que explorou uma abordagem industrial para a produção de agregado calcinado de argila, e Nascimento (2005), que utilizou o agregado em misturas solo-agregado e asfálticas, já demonstraram maneiras viáveis de incorporar a argila calcinada em pavimentação. Portanto, nesta pesquisa, planeja-se explorar a inclusão dos rejeitos no processo, seja na forma de partículas arenosas ou de lama vermelha, visando promover sua reutilização de maneira sustentável.

Dessa forma, este estudo, visa aprofundar a caracterização dos fatores e das características que influenciam as propriedades desses materiais, buscando contribuir para um melhor entendimento e utilização sustentável desses recursos.

MATERIAIS E MÉTODOS



DOI: [10.29327/1430212.49-62](https://doi.org/10.29327/1430212.49-62)

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA: CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE

Para produção de cerâmica vermelha a distribuição granulométrica é de fundamental importância para a composição das massas plásticas que passarão pelos processos de extrusão e queima. Para este tipo de aplicação considera-se que as argilas são compostas por material argiloso (plástico) e material não plástico. As argilas plásticas, denominadas na indústria cerâmica de “argilas gordas”, apresentam granulometria menor que 2 μm . A predominância destas argilas nas massas cerâmicas torna o processamento bastante complicado. Apresentam alta plasticidade, porém precisam de uma quantidade maior de água para desenvolvê-la completamente. Com isso ocorre um aumento de umidade no interior do produto, que provoca fortes retrações e deformações (PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997).

Os materiais não plásticos, representados essencialmente por areias, micas, óxidos de ferro e outros, atuam como agentes desplastificantes nas composições, reduzindo o grau de compactação da massa, com diminuição da plasticidade das argilas. Sua presença reduz as contrações tanto no processo de secagem como de queima. Para que possam agir com eficácia sobre as características das argilas devem apresentar granulometria acima de 60 μm e ser usadas em quantidades moderadas.

Diante do exposto, para a produção dos AAC, serão utilizados um solo arenoso, proveniente da cidade de Itacoara, Rio de Janeiro, misturado com um rejeito da mineração de ferro, proveniente de Itabirito, região central de Minas Gerais, conhecida por sua intensa atividade de extração mineral e um solo argiloso, coletado na região de Dourados, Mato Grosso do Sul, que provém do aterro de uma obra municipal.

Extrusão e Calcinação

Para o processo de extrusão da mistura, utilizou-se uma pequena maromba elétrica extrusora disponível no laboratório de solos do Instituto Militar de Engenharia (IME). As amostras extrudadas foram então cortadas com fio de nylon para garantir as dimensões desejadas. Posteriormente ao corte, as amostras foram deixadas para secar ao ar livre por 72 horas antes de prosseguir para o processo de calcinação.

Na etapa de calcinação, utilizou-se uma Mufla disponível no laboratório de geotecnia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), a temperatura de calcinação de 1100°C, com uma temperatura de patamar de 30 minutos e uma taxa de aquecimento de 10°C/min. A Figura 1 ilustra as etapas de preparação das amostras.



Figura 1. Equipamentos utilizados na extrusão e calcinação. a) Forma para mistura; b) Maromba elétrica; c) Fio de Nylon; d) Formas de metal para secagem; e) e f) Forno Mufla para calcinação à 1100C.

Caracterização Física

Os solos e o rejeito utilizados nessa pesquisa foram caracterizados por ensaios de granulometria por peneiramento NBR 7180 (ABNT, 1984) e sedimentação NBR 7181 (ABNT, 1984), densidade Real NBR 6508 (ABNT, 1984), teor de umidade NBR 6457 (ABNT, 2016) e limites de consistência NBR 6459 (ABNT, 1984) / NBR 7180 (ABNT, 1984).

Além disso, recorreu-se ao diagrama de Winkler para a classificação da qualidade do solo destinado à calcinação e produção do material cerâmico. O diagrama é utilizado nos estudos de granulometria para cerâmica, definindo zonas de granulometria mais adequadas para os produtos de cerâmica vermelha. O método utiliza os resultados da análise granulométrica por peneiramento e sedimentação para determinar a proporção do solo que se enquadra em três categorias distintas: partículas com diâmetro inferior a 2 micrômetros (fração argilosa), entre 2 e 20 micrômetros (fração siltosa) e superior a 20 micrômetros (fração arenosa).

Com base em pesquisas prévias realizadas no IME, conforme mencionadas por Cabral (2005), foram estabelecidos dois critérios para a definição de uma argila calcinada como sendo de alta qualidade: (i) Índice de Plasticidade (IP) superior a 15%; e (ii) granulometria em conformidade com o diagrama de Winkler. A Figura 2 mostra o diagrama granulométrico de Winkler e na Figura 3 são apresentadas as composições granulométricas de acordo com o diagrama.

Para os testes preliminares, Cabral (2005) se fundamentou em pesquisas conduzidas pelo IME, que indicavam os dois seguintes critérios para um agregado de argila calcinada de alta qualidade:

1. Índice de Plasticidade (IP) superior a 15%.
2. Granulometria conforme o diagrama de Winkler.



DOI: 10.29327/1430212.49-62

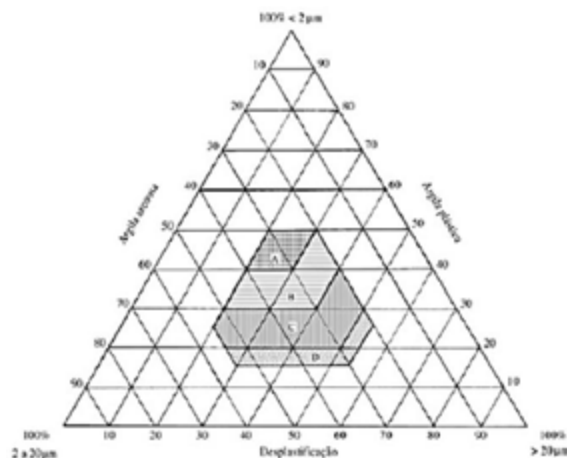
REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA:
CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE

Figura 2. Triângulo do Diagrama de Winkler (PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997)

Regiões	Composição granulométrica		
	2 μm	2 a 20 μm	20 μm
Tipos de produtos			
A - Materiais de qualidade	40 a 50	20 a 40	20 a 30
B - Telhas, capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
C - Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
D - Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	20 a 55

Fonte: PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997; MOTTA et al, 2001.

Figura 3. Granulometria dos produtos de cerâmica vermelha, de acordo com o Diagrama de Winkler (PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997).

Caracterização Mineralógica

Os difratogramas de raios X dos solos e rejeito estudados, obtidos pelo método do pó, foram examinados em um equipamento Bruker-D4 Endeavor, disponível no laboratório de materiais do IME com as seguintes configurações operacionais: radiação Co K α (40 kV/40 mA); velocidade do goniômetro de 0,02° 2 θ por passo com um tempo de contagem de 0,5 segundos por passo, abrangendo um intervalo de 4 a 80° 2 θ , com o detector LynxEye sensível à posição. As interpretações qualitativas dos espectros foram realizadas por meio de comparação com padrões disponíveis no banco de dados do software X'Pert HighScore Plus. A Figura 4, apresenta as amostras de cada material que foram posteriormente submetidas à análise por DRX.



Figura 4. Amostra dos materiais para o DRX.

Caracterização Das Amostras Da Argila Calcinada

Após a etapa de mistura, composta por solo arenoso (24,6%) + rejeito de mineração (33,4%) + solo argiloso (42,0%), seguida pelo procedimento de extrusão e calcinação, as amostras de AAAC foram encaminhadas para os ensaios de caracterização física e mecânica de agregados. Para avaliar a qualidade física dos agregados, foram realizados testes de absorção e densidade do agregado graúdo, conforme especificações do DNER 081/98 (1998). Além disso, para determinar a resistência mecânica dos agregados frente ao choque, os ensaios de perda ao choque foram conduzidos utilizando o aparelho Treton, seguindo os parâmetros estabelecidos pelo DNER 399/99 (1999).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização Do Solo Arenoso(A1)

A Tabela 1 apresenta os resultados da caracterização física do solo arenoso (A1), e a Figura 5 apresenta sua respectiva curva granulométrica.

Tabela 1. Caracterização física do solo A1.

Ensaio	Resultado
Densidade	2,69 g/cm ³
Limite de Liquidez	43,4%
Limite de Plasticidade	34,1%
Índice de Plasticidade (IP)	9,3%



DOI: 10.29327/1430212.49-62

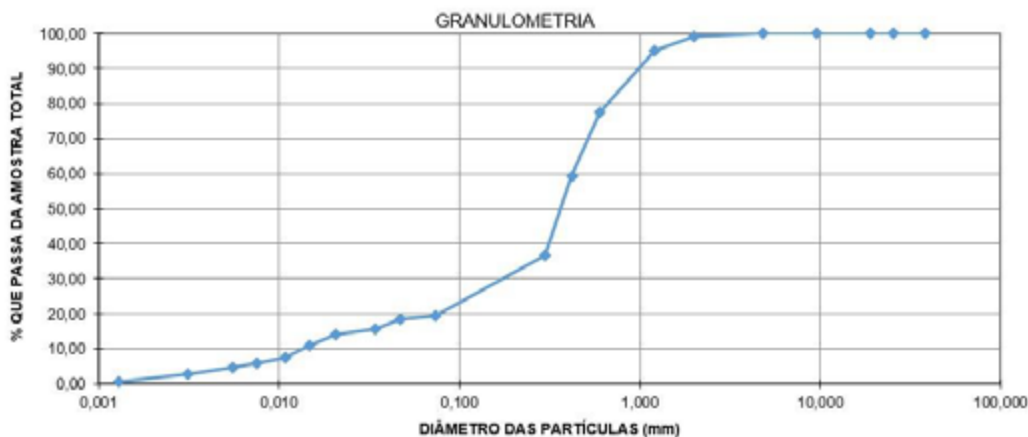
**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA:
CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE**


Figura 5. Curva granulométrica do solo A1.

A Tabela 2 apresenta a caracterização mineralógica do solo A1.

Tabela 2. Caracterização mineralógica do solo A1.

Amostra	Elementos presentes	Geometria
A1 (Solo Arenoso)	*Quartzo - Óxido de Silício (SiO_2)	Hexagonal
	* Hematita - Óxido de Ferro (Fe_2O_3)	Romboédrica

Caracterização Do Rejeito(A2)

A Tabela 3 apresenta os resultados da caracterização física do rejeito (A2). Ao contrário do solo A1 o rejeito foi avaliado granulometricamente apenas pelo ensaio de sedimentação pois o material era todo passante na peneira 200. Sua curva granulométrica é apresentada na Figura 6. A respectiva caracterização mineralógica é apresentada na Tabela 4.

Tabela 3. Caracterização física do solo A2.

Ensaio	Resultado
Densidade	3,36g/cm ³
Limite de Liquidez	43,9%
Limite de Plasticidade	31,0%
Índice de Plasticidade (IP)	12,9%



Murilo Miguel Narciso,
Lisley Madeira Coelho,
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

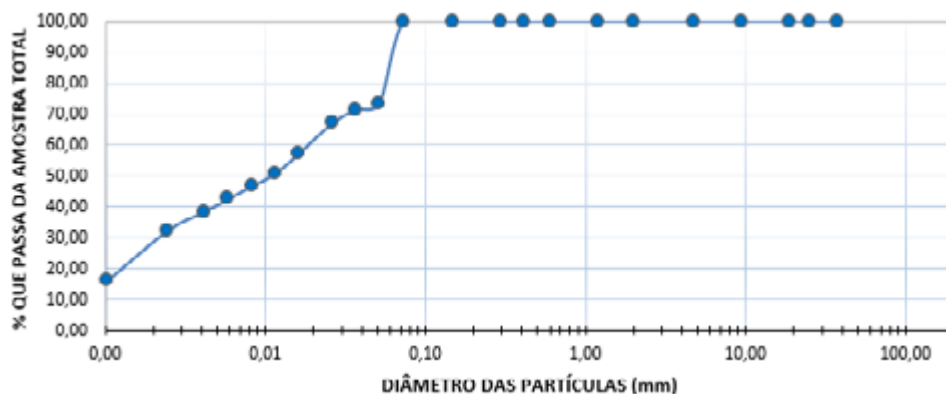


Figura 6. Curva de sedimentação para o rejeito A2.

Tabela 4. Caracterização mineralógica do composto A2.

Amostra	Elementos presentes	Geometria
A2 (Rejeito)	*Hematita - Óxido de Ferro (Fe_2O_3)	Romboédrica
	*Hydrohematita - ($Fe_2O_3 \cdot xH_2O$)	-
	*Moissanita - Carbeto de Silício (SiC)	Cúbica
	*Kaolinita - Hidróxido de Silicato de Alumínio ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)	Monoclínica

Caracterização Do Solo Argiloso(A3)

A Tabela 5 apresenta os resultados da caracterização física do solo (A3). Da mesma forma que o rejeito, o solo A3 (argiloso) foi avaliado granulometricamente pelo ensaio de peneiramento e sedimentação, sua curva de granulometria é apresentada na Figura 7. A caracterização pelo DRX é apresentada na Tabela 6.

Tabela 5. Caracterização física do solo argiloso (A3).

Ensaio	Resultado
Densidade	2,77 g/cm ³
Limite de Liquidez	43,9%
Limite de Plasticidade	31,0%
Índice de Plasticidade (IP)	12,9%



DOI: 10.29327/1430212.49-62

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA:
CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE

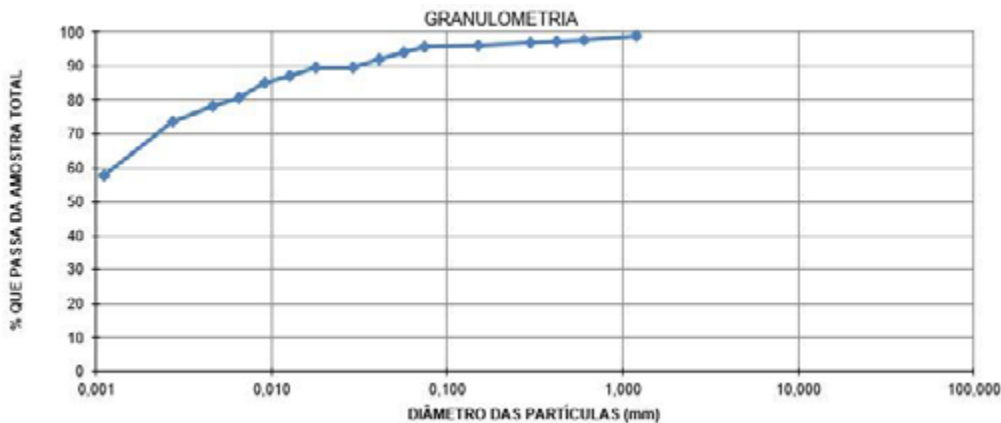


Figura 7. Curva granulométrica do solo A3.

Tabela 6. Caracterização mineralógica do solo A3.

Amostra	Elementos presentes	Geometria
A3 (Solo Argiloso)	*Hematita - Óxido de Ferro (Fe_2O_3)	Romboédrica
	*Quartzo - Óxido de Silício (SiO_2)	Hexagonal
	*Caulinita - Alumínio Silicato Hidroxilado ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)	Anortica
	*Hidrohematita - Óxido de Ferro Hidratado ($Fe_2O_3 \cdot xH_2O$)	-

Nota-se que o argilomineral predominante em todas as amostras foi a Hematita, que é um mineral que faz parte de solos de regiões tropicais e subtropicais e confere a cor vermelha aos solos.

Classificação de Winkler

Com relação a aplicação como material cerâmico, baseado nos dados do diagrama de Winkler (Figura 8) e de acordo com os parâmetros apresentados na Figura 3, a mistura (A1-24,6%; A2-33,4%; A3-42,0%) apresenta concentrações na faixa limiar entre a região B e C, sendo a composição granulométrica deste ponto, ilustrado em vermelho na Figura 8, escolhida por ser considerada um material cerâmico bom para telhas e capas, bem como para tijolos furados.

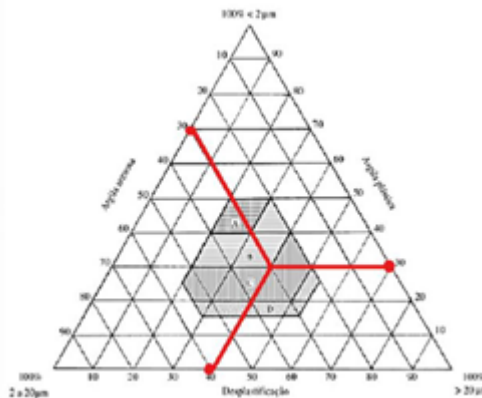


Figura 8. Diagrama de Winkler da mistura.



Seguindo as diretrizes de Cabral (2005), é importante que a mistura calcinada tenha um índice de plasticidade acima de 15%. No entanto, ao examinar o solo A3, que compõe a maior parte (42%) da mistura, observamos que o índice de plasticidade resultante da combinação de solo arenoso, rejeito e argila foi de 12,9%. Isso significa que, embora a mistura atenda a um critério, não atende ao critério principal estabelecido por Cabral (índice de plasticidade >15%).

Caracterização Do AAAC Produzido

Na Figura 9 é apresentada a característica visual do rejeito calcinado e a Tabela 8 apresenta os resultados da caracterização física e uma comparação com valores normatizados (DNER EM 230/94) e encontrados por Cabral (2005) e Barbosa; Marques e Guimarães (2018), sendo que ambos também realizaram pesquisas com argila calcinada.



Figura 9. Agregado após calcinação em 1100°C em forno mufla.

Tabela 8. Resultados da mistura areno-rejeito-argila em comparação com limites prescritos pela norma DNER -EM 230/94, e resultados encontrados por Cabral (2005) do Barbosa; Marques e Guimarães (2018).

Tipo de Ensaio	Limite DNER EM 230/94 [17]	Limite Met. Cabral (2005) [9]	Limite Met. Barbosa; Marques e Guimarães (2018) obtido em 1100°C (2018)	Valores obtidos na mistura à 1100°C
Absorção	-	≤ 18	2,8	11,5
Massa específica aparente	-	-	2,2	1,6
Massa unitária	≥ 0,8	-	1,3	-
Perda após fervura	≤ 10	≤ 6	0,4	-
Perda ao choque Treton	-	≤ 60	22,2	71,3
Desgaste por abrasão Los Angeles	≤ 45	≤ 50	22,8	-

De acordo com a Tabela 8, a mistura areno-rejeito-argilosa estudada, apresentou valor de absorção superior em relação aos valores de Barbosa; Marques e Guimarães (2018), porém dentro das perspectivas de limites apresentadas por Cabral (2005). Além disso, de acordo com o limite mínimo



DOI: [10.29327/1430212.49-62](https://doi.org/10.29327/1430212.49-62)

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA: CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE

descrito por Cabral (2005) de perda ao choque Treton a mistura estudada não se enquadra. Os ensaios de massa unitária, perda após fervura e desgaste por abrasão Los Angeles não puderam ser realizados devido à falta de amostra disponível para a pesquisa, já que esses testes exigem uma quantidade maior de solo.

A tentativa de produzir uma mistura baseada unicamente na granulometria adequada para a calcinação de materiais cerâmicos, conforme o diagrama de Winkler e o índice de plasticidade (IP) do material, não foi trivial. O método proposto por Winkler para a granulometria dos solos adequados à produção de cerâmica é direcionado para misturas majoritariamente compostas por solos argilosos, e na presente pesquisa utilizou-se uma mistura de areia, argila e rejeito. Dessa forma, misturas que não sejam em sua maioria compostas por solos argilosos, não conseguem ser classificadas exclusivamente pelos métodos utilizados nesse estudo.

CONCLUSÕES

Com o intuito de contribuir para a investigação das propriedades físicas e a viabilidade da produção de agregados artificiais de argila calcinada, integrando rejeitos de mineração, esta pesquisa conduziu uma série de ensaios de caracterização física e mineralógica. Foram analisados solo arenoso, solo argiloso e rejeito de mineração de ferro, além da avaliação da mistura desses materiais e dos processos de extrusão e calcinação. Essa abordagem permitiu uma compreensão das características dos materiais envolvidos e seu potencial de aplicação como agregados artificial calcinado. Assim, algumas observações importantes podem ser destacadas:

Observou-se que durante o processo de modelagem do agregado, devido a alta percentagem de solo arenoso presente na mistura, ocorreu uma dificuldade no processo de extrusão. Além disso, uma baixa quantidade de argila dificultou as características plásticas do material. Uma maior presença de solo argiloso, conforme pesquisa de Friber *et al.* (2023), demonstra maior facilidade de extrusão e maior índice de plasticidade.

O índice de plasticidade tem influência direta na viabilidade de realização do procedimento de extrusão e calcinação. Visto que, apesar de estar adequada ao diagrama de Winkler, e o IP estar próximo ao limite mínimo de 15% proposto por Cabral (2005), a mistura não apresentou condições de manuseio viáveis para a realização do procedimento de extrusão.

Diante dessas observações, conclui-se ser essencial analisar a mineralogia da mistura, garantindo que as frações de solo arenoso fino e rejeito não ultrapassem preferencialmente 20%, para não comprometer as propriedades de trabalhabilidade e produção cerâmica da argila. Para futuras pesquisas, sugere-se: uma revisão da metodologia proposta, com maior detalhamento das fases de produção e uso do AAAC e uma busca por normas técnicas adaptadas aos agregados porosos e absorvente, focando na avaliação do desempenho em vez de especificações genéricas voltadas para agregados de rochas britadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. NBR 7180. Solo – **Análise granulométrica.**

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. NBR 6459. Solo – **Determinação do limite de liquidez.**



ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. NBR 7180. Solo **Determinação do limite de plasticidade.**

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. NBR 7181. Solo – **Análise granulométrica por sedimentação.**

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 6457. Solo – **Teor de umidade.**

Barbosa, V.H.R., Marques, M.E.S., & Guimarães, A.C.R. (2018). **Mineralogical characterization of a soil in acre for the production of artificial calcined clay aggregates.** *Matéria*, 23, e-12181. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0515>.

CABRAL, G. L. L. **Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação.** (2005). 358 p. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1998. ME 081/98 – Agregados – **determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo.** Rio de Janeiro, RJ.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1999. ME 399/99 – Agregados – **determinação da perda ao choque no aparelho Treton.** Rio de Janeiro, RJ.

Friber, Marcio & Guimarães, Antônio & Martins, Camila & Soares, Jefferson. (2023). **Study of the Mining Waste in the Production of Calcined Aggregate for Use in Pavement.** *Minerals*. 13. 1543. <http://dx.doi.org/10.3390/min13121543>.

NASCIMENTO, R. R. **Utilização de agregados de argila calcinada em pavimentação: uma alternativa para o estado do Acre.** 2005. 165 p. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

Nawel, S.; Mounir, L.; Hedi, H. **Effect of temperature on pozzolanic reaction of Tunisian clays calcined in laboratory.** *SN Appl. Sci.* 2020, 2, 157.

POLIVANOV, H., MOTTA, L. M. G., MODESTO, F. B. F., BARROSO, E. V. **Argilas calcinadas para uso em pavimentos rodoviários.** *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*. Nº 04, 2015

PRACIDELLI, Sebastião, MELCHIADES, Fábio G. **Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha.** *Cerâmica Industrial*, v.2, n. 12, p. 31-35, Janeiro/Abril 1997.

Tironi, A.; Trezza, M.A.; Scian, A.N.; Irassar, E.F. **Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans.** *Constr. Build. Mater.* 2012, 28, 276 281.



PRODUÇÃO DE PÓ DE VIDRO MOÍDO A PARTIR DE RESÍDUOS PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA

Lucas Eduardo Dornelles¹; Bethania Machado Correa¹

RESUMO

Em um contexto de desenvolvimento sustentável, a utilização de materiais alternativos para o melhoramento de solos em obras de infraestrutura tem se mostrado uma excelente alternativa. Neste panorama, este trabalho teve como objetivo a produção de pó de vidro moído obtido a partir de resíduos, visando a sua aplicação como material cimentante em camadas de solos de obras de infraestrutura. O pó de vidro pode ser obtido a partir dos processos de moagem, trituração e peneiramento de vidro de descartes, como garrafas não-retornáveis e vidros planos. No estudo, optou-se pela avaliação da estabilização de um solo residual argiloso com o uso de pó de vidro moído e adição de cal de carbureto, resíduo gerado na produção industrial do gás acetileno. O pó de vidro foi produzido a partir de vidro de garrafas não retornáveis. Em laboratório, corpos-de-prova foram moldados com as adições e posteriormente ensaiados no ensaio de compressão diametral. A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar que a utilização do pó de vidro, aliado a adição de cal de carbureto, permite a obtenção de materiais mais resistentes. Assim, conclui-se que a estabilização de solos com resíduos, como o pó de vidro moído, é uma alternativa viável para diversas obras de infraestrutura, como camadas de suporte para fundações de obras de arte especiais, proteção de taludes rodoviários e em camadas de pavimentos rodoviários e ferroviários.

PALAVRAS-CHAVE: pó de vidro; melhoramento; infraestrutura; desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

In a context of sustainable development, the use of alternative materials for soil improvement in infrastructure works has proven to be an excellent alternative. In this context, this paper aimed to produce ground glass powder obtained from waste, aiming for its application as a cementing material in layers of soil in infrastructure works. Glass powder can be obtained from the processes of grinding, crushing and sieving waste glass, such as non-returnable bottles and flat glass. In the study, it was decided to evaluate the stabilization of a clayey residual soil with the use of ground glass powder and the addition of carbide lime, a residue generated in the industrial production of acetylene gas. The glass powder was produced from non-returnable bottles. In the laboratory, specimens were molded with the additions and subsequently tested in the diametral compression test. From the results obtained, it was possible to identify that the use of ground glass powder, combined with the addition of carbide lime, allows the production of more resistant materials. Thus, it is concluded that the stabilization of soils with waste, such as ground glass powder, is a viable alternative for various infrastructure works, such as support layers for foundations of special works of art, protection of road embankments and in layers of road and railway pavements.

KEY WORDS: ground glass powder; improvement, infrastructure, sustainable development.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), lucascivilufsm@gmail.com; bethania.correa@ufrgs.br



INTRODUÇÃO

A presença de solos com condições geotécnicas desfavoráveis, como solos expansivos, solos colapsíveis e solos com baixa capacidade de suporte, demanda a adoção de técnicas de engenharia especiais para implantação de obras rodoviárias nestas regiões. Em tais condições desfavoráveis, é necessário adotar técnicas que permitam a melhoria das propriedades dos materiais, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas (Cristelo, 2001).

O melhoramento químico dos materiais é comumente feito com a adoção de produtos convencionais como cimento Portland e cales comerciais. Porém, sabe-se que a produção industrial destes resulta em elevadas emissões de gases de efeito estufa, alto consumo energético e dependência de extração mineral.

Em um contexto de desenvolvimento sustentável, a utilização de materiais alternativos para o melhoramento de solos em obras de infraestrutura tem se mostrado uma excelente alternativa. Além da redução do consumo de recursos naturais não-renováveis e substituição de produtos como o cimento Portland, este desenvolvimento também permite dar uma destinação nobre a materiais que seriam descartados ou depositados em aterros.

Scheuermann Filho (2019) relata algumas aplicações do vidro, como na substituição parcial e/ou total de agregados finos em concreto com cimento Portland, incorporação de vidro moído em misturas de concreto asfáltico como agregado e/ou material de preenchimento (*filler*), aplicação de pó de vidro em misturas com materiais pétreos para bases e sub-bases de pavimentos, entre outros.

Neste panorama, este trabalho teve como objetivo a produção de pó de vidro moído obtido a partir de resíduos, visando a sua aplicação como material cimentante em camadas de solos em obras de infraestrutura. O pó de vidro pode ser obtido a partir dos processos de moagem, trituração e peneiramento de vidro de descartes, como garrafas não-retornáveis e vidros planos.

Optou-se pela avaliação da estabilização de um solo residual argiloso com o uso de pó de vidro moído e adição de cal de carbureto, resíduo gerado na produção industrial do gás acetileno que apresenta hidróxido de cálcio em sua composição. Em virtude da disponibilidade de sílica em estado amorfo em sua composição, o pó de vidro apresenta uma atividade pozolânica.

Ao ser finamente moída e na presença de água, a sílica tem o potencial de reagir com o hidróxido de cálcio da cal de carbureto e formar compostos cimentantes. As reações que ocorrem neste processo são denominadas reações pozolânica, e elas permitem o desenvolvimento de materiais com melhores resistências, rigidezes e durabilidades.

Bilondi et al. (2018) estudaram a utilização de cal de carbureto na estabilização de solos argilosos em misturas com adições de pó de vidro. Foi identificada uma tendência de aumento da resistência à compressão simples com o aumento do tempo de cura até o período de 28 dias. Além disso, o aumento da temperatura de cura também refletiu em um ganho de resistência para os períodos de sete e 28 dias de cura, se mostrando menos efetivo para os períodos maiores.

Assim, dentro de uma visão de desenvolvimento econômico, ambiental e social, aliado a adoção de práticas e materiais mais sustentáveis, a estabilização de solos com resíduos, como o pó de vidro moído, pode ser uma alternativa viável para diversas obras de infraestrutura, como camadas de suporte para fundações de obras de arte especiais, proteção de taludes rodoviários e em camadas de pavimentos rodoviários e ferroviários.

METODOLOGIA

Inicialmente, são apresentadas as características dos materiais utilizados no estudo, quais sejam, o solo argiloso, o pó de vidro moído e a cal de carbureto, e suas características avaliadas através de



DOI: [10.29327/1430212.49-66](https://doi.org/10.29327/1430212.49-66)

PRODUÇÃO DE PÓ DE VIDRO MOÍDO A PARTIR DE RESÍDUOS PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE INFRAESTUTURA

ensaios de laboratório. Além disso, enfatiza-se o método utilizado para a produção do pó de vidro moído em laboratório.

Pó de vidro

O objetivo principal do estudo foi a produção de pó de vidro moído para aplicação em obras de infraestrutura. Inicialmente, de modo a se ter um material padronizado, optou-se por utilizar vidro proveniente somente de garrafas de cor verde, do tipo não retornáveis. Todas as garrafas foram coletadas na Central de Descarte de Vidros do município de Ijuí/RS. Após a coleta, as garrafas foram lavadas com água e sabão neutro, e posteriormente passaram por secagem ao ar.

O processo de trituração e moagem das garrafas para a obtenção do pó de vidro foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologias da Construção (LATEC) da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES. De modo a se obter um material com o maior nível de homogeneidade possível, seguiu-se um procedimento padronizado, conforme descrito a seguir.

Inicialmente, as garrafas foram grosseiramente quebradas com o auxílio de um martelo, de modo a se produzir cacos de vidro. Na sequência, os cacos foram triturados em um britador de mandíbulas. O material produzido nesta etapa foi separado em frações de 1,5 kg para ciclagem no moinho de bolas metálicas, com número de giros variando entre 1500 e 2000. Manteve-se constante o número e o tamanho das bolas metálicas utilizadas em cada ciclo de moagem. A Figura 1 mostra os equipamentos utilizados na produção do pó de vidro.



Figura 1. Equipamentos utilizados na trituração e moagem do vidro (AUTORES, 2024).

Após a moagem no moinho de bolas, o material resultante desta etapa do processo foi peneirado até a fração que foi utilizada no estudo, qual seja, o material passante na peneira de malha número 200 (diâmetro das partículas inferior a 0,075mm). O peneiramento resultou em um rendimento entre 30 e 40%, ou seja, cada amostra de 1,5 kg submetida ao processo de moagem resultou em cerca de 500g de material passante na peneira de número 200. A Figura 2 apresenta o aspecto do pó de vidro passante na peneira de número 200.



Figura 2. Pó de vidro moído passante na peneira 200 (AUTORES, 2024).

A Figura 3 apresenta a distribuição granulométrica obtida para o pó de vidro através do método da granulometria a laser e a Tabela 1 mostra algumas das características físicas do pó de vidro moído, assim como as frações granulométricas obtidas.

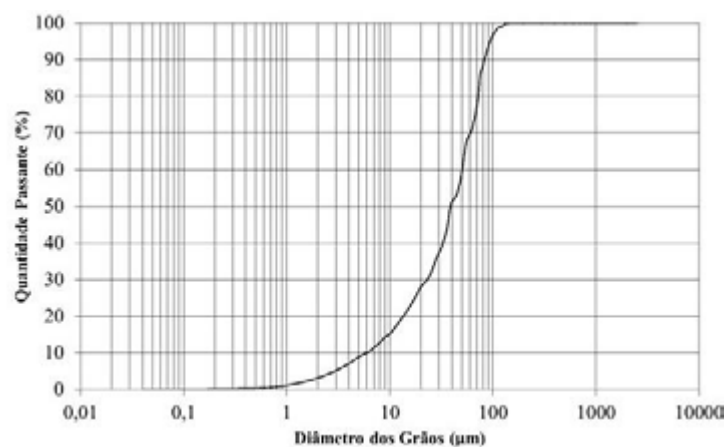


Figura 3. Distribuição granulométrica do pó de vidro moído (AUTORES, 2024).

Tabela 1. Características físicas do pó de vidro moído (AUTORES, 2024).

Característica	Resultado	Normativa/Método
Peso específico real dos grãos (Gs)	2,35 g/cm ³	ABNT NBR 6508
Superfície específica (SSA)	4,821 m ² /g	Análise BET
pH	10,39	ASTM D4972
% Passante na peneira #200	100%	
% Silte (0,002 < d < 0,06mm)	97%	ABNT NBR 7181
% Argila (d < 0,002mm)	3%	



DOI: 10.29327/1430212.49-66

PRODUÇÃO DE PÓ DE VIDRO MOÍDO A PARTIR DE RESÍDUOS
PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE INFRAESTUTURA

O valor de superfície específica do pó de vidro (SSA), obtido a partir da análise BET, é de 4,821 m²/g. Sales (2014) obteve valores próximos para o pó de vidro em seu estudo, isto é, 5,23 m²/g para o pó de vidro oriundo de vidro incolor e 3,06 m²/g para o oriundo do vidro âmbar. Scheuermann Filho (2019), ao estudar pó de vidro obtido a partir de garrafas comuns de cor marrom obteve um valor de superfície específica de 5,45 m²/g. Os valores obtidos, em todos casos supracitados, são superiores aos que enquadrariam o material como uma pozolana reativa, conforme indicado por Sales (2014).

Também foi realizado o ensaio de Difração de Raios-X (DRX) do pó de vidro. Não foram identificadas fases minerais, indicando a inexistência de uma estrutura bem definida. Assim, é possível caracterizar o material como altamente amorfo.

Solo Argiloso

O solo utilizado neste estudo foi coletado às margens da RS-342, km 120, entre os municípios de Ijuí e Boa Vista do Cadeado, no noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Após a coleta do material em campo, foram realizados em laboratório os ensaios de caracterização física e mecânica do solo. São eles a análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, Limites de Atterberg, peso específico real dos grãos, compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC), além dos ensaios classificatórios da metodologia MCT. A Tabela 2 apresenta um resumo das características do solo estudado.

Tabela 2. Características do solo estudado (AUTORES, 2024).

Característica	Resultado	Normativa utilizada
Limite de Liquidez (LL)	79	ABNT NBR 6459
Limite de Plasticidade (LP)	60	ABNT NBR 7180
Índice de Plasticidade (IP)	19	-
Peso específico real dos grãos (Gs)	2,89 g/cm ³	ABNT NBR 6508
% Areia média	10%	
% Areia fina (0,06 < d > 0,2mm)	10%	
% Silte (0,002 > d > 0,06mm)	37%	ABNT NBR 6502
% Argila (d < 0,002mm)	43%	
Classificação SUCS	CH	-
Classificação TRB	A-7-5	-
Classificação MCT	NG'	-
Índice de Suporte Califórnia (%)	5,2 (Energia normal)	ABNT NBR 9598
Expansão (%)	2,21 (Energia normal)	

De acordo com o sistema da *Transportation Research Board* (TRB) o solo é enquadrado como um solo argiloso do subgrupo A-7-5, enquanto que conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo estudado é classificado como um CH, ou seja, uma argila inorgânica de alta plasticidade. Estas classificações agrupam materiais que podem ser altamente elásticos e sujeitos a elevadas mudanças de volume. Além disso, são enquadrados como materiais de fraco a pobre



comportamento quando utilizados como subleito rodoviário. Os valores de ISC e expansão também indicam que o solo não é indicado para utilização em subleitos rodoviários.

Em adição, ao se classificar o solo pela metodologia MCT, de Nogami e Villibor (1981), conclui-se que o solo apresenta com comportamento não laterítico (NG'). Solos deste tipo (Classe N) apresentam, de uma forma geral, valores de capacidade de suporte abaixo dos índices classificatórios tradicionais, além de poderem apresentar altos valores de expansão. Mais que isso, são geralmente erodíveis e possuem baixos valores de ISC e módulo resiliente, de modo que são considerados inadequados para uso em pavimentação.

Desta forma, tantos os sistemas tradicionais de classificação quanto a metodologia MCT indicam que o solo não é recomendado para utilização em camadas de pavimentos rodoviários, o que reforça a necessidade de adoção de técnicas para melhoria de suas propriedades.

Cal de carbureto

A cal de carbureto utilizada na pesquisa é um resíduo da produção de gás acetileno de uma indústria de Esteio/RS, região metropolitana de Porto Alegre. O material foi coletado em um estado úmido e com consistência aquosa (umidade entre 48 e 80%). Por isso, passou por secagem a 50° C por dois a três dias antes de sua utilização. Em seguida, o material foi destorroado e passado em peneira de malha #100 ($d < 0,149\text{mm}$), de modo a se obter um material com um bom nível de uniformidade. A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas do material estudado em laboratório.

Tabela 3: Características da cal de carbureto (AUTORES, 2024).

Característica	Resultado	Normativa/método
Peso específico real dos grãos (Gs)	2,19 g/cm ³	ABNT NBR 6508
Superfície específica (SSA)	22,60 m ² /g	Análise BET
pH	12,4	ASTM D4972
% Areia fina (0,06 < d < 0,2mm)	10%	
% Silte (0,002 < d < 0,06mm)	83%	Granulometria a laser
% Argila (d < 0,002mm)	7%	

De modo a se atender ao principal objetivo do estudo, qual seja, a avaliação da efetividade da produção de pó de vidro moído para melhoramento de solos visando aplicação em obras de infraestrutura, definiu-se o programa experimental do estudo. A metodologia do estudo pode ser sintetizada como a estabilização de um solo residual argiloso com adições de diferentes teores de pó de vidro moído e cal de carbureto, estudadas em misturas com diferentes pesos específicos secos, tempos e temperaturas de cura. A estabilização do solo foi avaliada através da realização de ensaios de compressão diametral.

Programa experimental

Foram definidas oito misturas diferentes a serem estudadas, conforme a Tabela 4. Elas foram avaliadas em dois tempos de cura (sete e 28 dias) e em duas temperaturas de cura (23°C e 40°C).



DOI: 10.29327/1430212.49-66

PRODUÇÃO DE PÓ DE VIDRO MOÍDO A PARTIR DE RESÍDUOS
PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE INFRAESTUTURA

Tabela 4. Misturas utilizadas no estudo (AUTORES, 2024).

Mistura	Peso específico aparente seco (kN/m ³)	Teor de pó de vidro (%)	Teor de cal (%)
1	13	10	3
2	15	10	3
3	13	30	3
4	15	30	3
5	13	10	7
6	15	10	7
7	13	30	7
8	15	30	7

Em solos argilosos com adição de pozolana e cal, com a devida hidratação, o aumento no teor de pozolana resulta em uma disponibilidade imediata de sílica e/ou alumina. Assim, há uma maior formação de compostos cimentantes em um prazo menor, em comparação à solos em que há somente adição de cal. As quantidades usuais de pozolanas utilizadas, em relação à massa seca de solo, variam entre 10 e 40%. Neste estudo, foram definidos os teores de pó de vidro moído de 10 e 30% em relação à massa seca total das misturas.

O teor mínimo de cal foi determinado a partir do método do ICL (*Initial Consumption of Lime*), proposto por Rogers et al. (1997). O método consiste na adição de teores crescentes de cal na mistura, com medições da variação de pH. Define-se como teor mínimo de cal aquele que leva a um valor máximo e constante de pH, que indica o teor de cal necessário para o início das reações pozolânicas. Neste estudo, o valor encontrado foi de 3%.

Os valores de porosidade das misturas, controlados a partir dos pesos específicos aparentes secos (γ_d) e umidades de moldagem foram definidos de acordo com a curva de compactação do solo (valores de γ_d entre 13 kN/m³ e 15 kN/m³ e teores de umidade de moldagem entre 28 e 30%). Por fim, optou-se pela cura acelerada através do aumento da temperatura das amostras em função das reações pozolânicas serem consideravelmente lentas. Por isso, foram estabelecidas duas temperaturas de cura (23° C e 40° C).

Moldagem dos corpos de prova

Em laboratório, os corpos de prova foram elaborados através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação estática, desmoldagem, armazenamento e cura. A compactação da amostra é feita de forma estática, em três camadas, no interior de um molde metálico tripartido devidamente lubrificado, conforme a Figura 4. O molde apresenta as dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Durante o período de cura, as amostras curadas a temperatura de 23° C foram colocadas em uma câmara úmida, e as amostras curadas a 40° C foram seladas em uma embalagem hermética e imersas em água com esta temperatura.



Figura 4. Molde tripartido utilizado para moldagem de corpos-de-prova (AUTORES, 2024).

Ensaio de compressão diametral

Os ensaios de compressão diametral foram realizados de acordo com a normativa norte-americana ASTM C496 (ASTM, 2017). Utilizou-se uma prensa automática com deslocamento controlado, mostrada na Figura 5. Antes da ruptura, os corpos-de-prova foram submetidos a imersão em água por 24h, na mesma temperatura utilizada para a cura. Deste modo, minimizaram-se eventuais efeitos da sucção. Este procedimento também é utilizado para avaliar a ocorrência de reações que promovam algum tipo de cimentação nas misturas. Caso a cimentação ocorrida não tivesse sido suficiente, provavelmente o corpo-de-prova seria dissolvido na água. Por este motivo, não foram moldadas amostras de solo sem nenhuma adição.

Após o período mínimo de 24h em imersão, cada amostra foi submetida ao ensaio de pulso ultrassônico, que será apresentado no item a seguir. Após, cada espécime foi submetido ao ensaio de compressão diametral.



Figura 5. Ensaio de compressão diametral (AUTORES, 2024)



DOI: 10.29327/1430212.49-66

PRODUÇÃO DE PÓ DE VIDRO MOÍDO A PARTIR DE RESÍDUOS
PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE INFRAESTUTURA

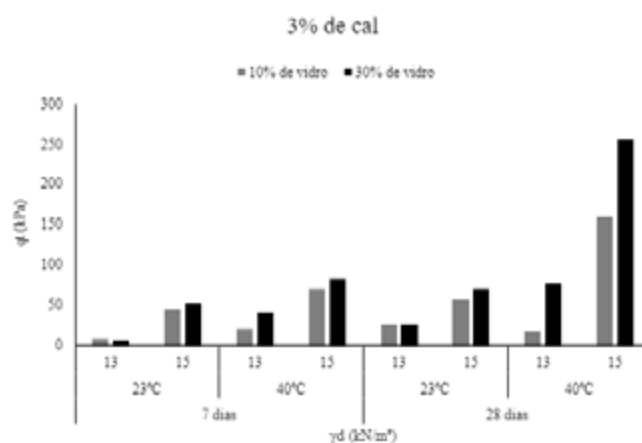
RESULTADOS E ANÁLISES

Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de compressão diametral foram realizados para misturas com pesos específicos aparentes secos de 13,0 kN/m³ e 15 kN/m³, com teores de pó de vidro de 10% e 30% e teores de cal de carbureto de 3% e 7%. Ainda, utilizaram-se os tempos de cura de sete e 28 dias e temperaturas de cura de 23°C e 40°C. Os resultados médios obtidos para as triplicatas estão apresentados na Tabela 5. As Figuras 6 e 7 ilustram estes valores. O valor máximo de q_t foi 594,68 kPa, para a amostra 8A, curada a 40°C por 28 dias.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (q_t) em kPa (AUTORES, 2024).

Mistura	Sete dias de cura		28 dias de cura	
	23°C	40°C	23°C	40°C
1A	7,41	20,12	25,30	17,44
2A	44,99	70,02	56,74	159,87
3A	6,98	41,43	25,45	77,06
4A	51,67	83,05	70,09	256,78
5A	12,38	88,56	80,77	181,76
6A	47,78	284,83	188,93	492,78
7A	26,58	164,58	144,54	328,78
8A	104,89	394,65	336,75	594,68

Figura 6. Variação da RTCD (q_t) em função dos diferentes parâmetros para 3% de cal (AUTORES, 2024).

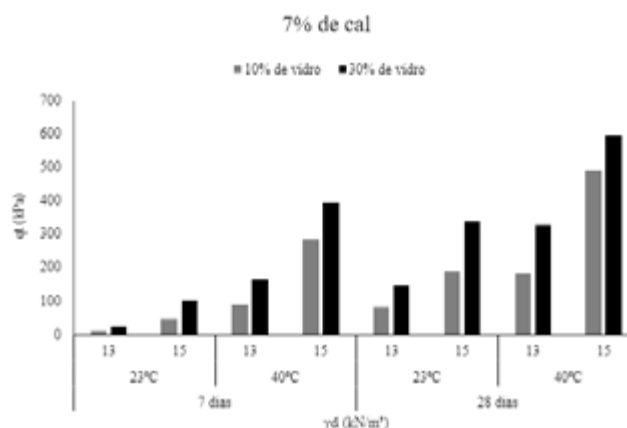


Figura 7. Variação da RTCD (q_t) em função dos diferentes parâmetros para 7% de cal (AUTORES, 2024).

A partir dos resultados exibidos nos gráficos e nas figuras, é possível identificar que a resistência aumenta com a elevação do teor de cal de carbureto, conforme já havia sido identificado por Saldanha (2014). Isso indica que teores de cal inferiores à 7% não são suficientes para a obtenção das maiores resistências. Todavia, um maior tempo de cura pode ser necessário para que essa hipótese seja confirmada, uma vez que parte do hidróxido de cálcio excedente pode ainda não ter reagido com a cal no período de 28 dias.

De forma análoga, identifica-se também a elevação dos valores de q_t com o aumento do peso específico aparente seco e conseqüente redução da porosidade das misturas. Independentemente da quantidade de cal utilizada, a redução na porosidade do material promove ganhos consideráveis de resistência. Esse efeito é explicado, em parte, pelo maior intertravamento entre as partículas do solo em virtude da maior área de contato para o desenvolvimento das reações no sistema e pela maior compacidade da mistura.

Por outro lado, a elevação do teor de pó de vidro moído de 10% para 30% não representou uma variação considerável na resistência das amostras. Isso pode indicar que existe uma espécie de competição entre as partículas do solo e da pozolana pelo consumo da cal de carbureto, qual seja, as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água antes de reagir com o pó de vidro. De qualquer forma, a adição conjunta do pó de vidro moído e cal de carbureto permite a obtenção de materiais mais resistentes.

Güllü et al. (2017) estudaram o comportamento de um solo argiloso artificialmente cimentado com cimento Portland e adição de pó de vidro. Os autores concluíram que um maior teor de adição de vidro representa também um maior tempo necessário para o ganho de resistência da mistura. Além disso, eles identificaram a existência de um teor ótimo de vidro que maximiza o ganho de resistência nas misturas, sendo que ao se ultrapassar este valor a adição se torna prejudicial.



DOI: [10.29327/1430212.49-66](https://doi.org/10.29327/1430212.49-66)

PRODUÇÃO DE PÓ DE VIDRO MOÍDO A PARTIR DE RESÍDUOS
PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA

Análise Estatística

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente no software Minitab v.18, de modo a se avaliar o efeito de cada uma das variáveis no comportamento das misturas estudadas. A Figura 8 mostra o gráfico dos efeitos principais ou de primeira ordem obtido para estes resultados.

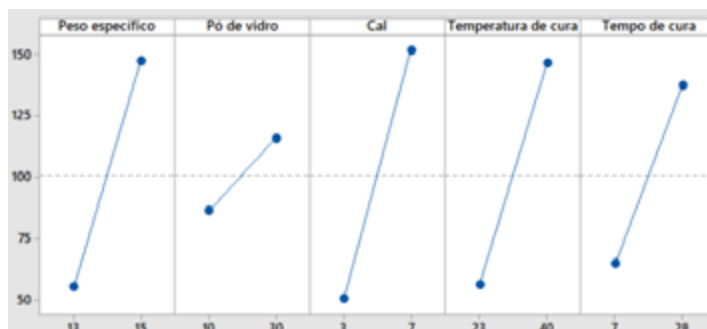


Figura 8. Efeitos principais para q_t (AUTORES, 2024).

A partir do gráfico, é possível identificar que os fatores que mais exerceram efeito positivo sobre a resistência das misturas ensaiadas foram o peso específico, o teor de cal, a temperatura de cura e o tempo de cura. O teor de pó de vidro apresentou um efeito menor do que as outras variáveis supracitadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados, foi possível concluir que o teor de cal de carbureto exerceu considerável influência sobre os parâmetros estudados. O aumento deste teor de 3% para 7% resultou em uma melhora considerável no comportamento mecânico do material. A utilização do pó de vidro também permite uma melhora no comportamento, porém com influência menor.

Além disso, o aumento do peso específico aparente seco, e consequente redução da porosidade das misturas, também exerceu influência significativa nos valores obtidos. A elevação do teor de pó de vidro moído de 10% para 30% exerceu pouca influência na melhora do comportamento do material no que tange a resistência à tração por compressão diametral.

Por fim, tanto a elevação do tempo de cura (de sete para 28 dias) e da temperatura de cura (de 23°C para 40°C) resultaram em um aumento dos valores de q_t . Esse comportamento era esperado e comprova que a elevação da temperatura de cura pode ser utilizada em materiais deste tipo para a obtenção de melhores resistências à curto prazo.

Assim sendo, conclui-se que o procedimento de produção de pó de vidro a partir de garrafas não-retornáveis é viável visando a estabilização de solos para aplicações em obras de infraestrutura. Ao se utilizar materiais mais sustentáveis, como o pó de vidro moído e a cal de carbureto, e com a utilização da técnica de cura acelerada, é possível o desenvolvimento de materiais mais resistentes, duráveis e sustentáveis. Mesmo assim, são necessários estudos mais abrangentes e aprofundados, com aplicações em campo, para confirmar a possibilidade identificada.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D 4972: standard test methods for pH of soils. Philadelphia, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6502: Rochas e solos: terminologia. Rio de Janeiro, 1995. 18p. Origem: TB-3

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6508: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7180: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181: Análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9598: Solo – Índice de suporte Califórnia – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987. 14p. Origem: MB-2545.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). C 496: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Philadelphia, 2017.

BILONDI, M.P.; TOUFIGH, M.M.; TOUFIGH, V. Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass powder-clay geopolymer. *Construction and Building Materials*. 183. P. 417-428. 2018

CRISTELO, N.M.C. Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas, Geotecnia e Fundações. Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Braga, Portugal.

GÜLLÜ, H.; CANAKCI, H.; AL ZANGANA, I. F. Use of cement based grout with glass powder for deep mixing. *Construction and Building Materials*. 137, 12-20, 2017.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. 1981. In. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro.

ROGERS, C.D.F.; GLENDINNING, S.; ROFF, T.E.J. Lime modification of clay soils for construction expediency. *Proceedings: Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, 125(4), p. 242–249. 1997.

SALDANHA, R. B. Misturas cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples para cura acelerada. 2014. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia na área de Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SALES, F. A. Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland. 2014. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SCHEUERMANN FILHO, H.C. Estabilização de um Solo Dispersivo com Pó de Vidro Moído e Cal de Carbureto. 2019. 205f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.



EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RAP NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA DE MISTURAS DO TIPO BSM ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA

Daniel Wolter Martell¹; Washington Peres Núñez²; Lélío Antônio Teixeira Brito²

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da incorporação de RAP na resistência à tração indireta de misturas do tipo BSM estabilizadas com emulsão asfáltica. As misturas estudadas foram compostas por brita graduada simples (BGS), fresado (RAP), cimento e emulsão. Foram adicionados quatro teores de emulsão: 2,9%, 3,1%, 3,3% e 3,5%, definidos em função da granulometria dos materiais. Os percentuais de RAP incorporados foram de 20% e 40%, buscando simular, respectivamente, a técnica de reciclagem profunda (FDR) em uma estrutura de pavimento com revestimento asfáltico delgado e com espessura intermediária. O conteúdo de cimento foi fixado em 1%, para todas as amostras. Durante a moldagem dos corpos de prova, foi utilizada a compactação vibratória. O cimento empregado foi do tipo CP IV-32. Foi aplicada uma emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos de ruptura lenta, do tipo RL1C-E. Houve dificuldades para promover a densificação adequada dos corpos de prova, sendo que o martelo demolidor utilizado parece não ser indicado para compactação de materiais similares aos desse estudo. A incorporação de RAP promoveu um aumento nos valores do parâmetro ITS. Esse comportamento foi observado para todos os teores de emulsão asfáltica empregados e para ambas as condições de cura (seca e imersa). Os resultados obtidos indicam que o grau de compactação influencia de forma significativa o parâmetro ITS. O processo de quarteamento, realizado em laboratório para redução das amostras coletadas em campo, parece não ter sido eficaz para reduzir a variabilidade obtida nas densidades dos corpos de prova. Cabe destacar que dentre os 48 corpos de prova rompidos, o maior valor obtido para ITS foi de 312 kPa.

PALAVRAS-CHAVE: compactação vibratória; resistência à tração indireta; misturas tipo BSM, RAP, emulsão.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of incorporating RAP on the indirect tensile strength of BSM mixtures stabilized with asphalt emulsion. The mixtures studied were composed of graded crushed stone, reclaimed asphalt Pavement (RAP), cement and emulsion. Four emulsion levels were added: 2.9%, 3.1%, 3.3% and 3.5%, defined depending on the particle size of the materials. The percentages of RAP incorporated were 20% and 40%, seeking to simulate, respectively, the full-depth reclamation (FDR) in a pavement structure with thin and intermediate thickness asphalt coating. The cement content was set at 1% for all samples. During the molding of the specimens, vibratory compaction was used. The cement used was CP IV-32 type. A cationic asphalt emulsion modified by slow-breaking elastomeric polymers, type RL1C-E, was Applied. There were difficulties in promoting adequate densification of the specimens, and the demolition hammer used seems not to be suitable for compacting materials similar to those in this study. The incorporation of RAP promoted an increase in the values of the ITS parameter. This behavior was observed for all asphalt emulsion levels used and for both curing conditions (dry and soaked). The results obtained indicate that the degree of compaction significantly influences the ITS parameter. The quartering process, carried out in the laboratory to reduce samples collected in the field, appears not to have been effective in reducing the variability obtained in the densities of the specimens. It is worth noting that among the 48 specimens, the highest value obtained for ITS was 312 kPa.

KEY WORDS: vibratory compaction; indirect tensile strength; BSM mixtures, RAP, emulsion.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense, danielmartell@ifsul.edu.br.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, washington.nunez@ufrgs.br; lelio.brito@ufrgs.br.



INTRODUÇÃO

A engenharia civil pode ser considerada um dos pilares da economia mundial. O porte atingido pela indústria da construção tem sido alcançado por meio da utilização de inúmeros recursos naturais gerando, historicamente, um grande ônus ambiental. Essa percepção histórica, aliada aos conceitos atuais de sustentabilidade e economia circular, vem provocando uma mudança de postura na sociedade em geral. Dessa forma, cada vez mais estudos e pesquisas vêm sendo desenvolvidos no intuito de reutilizar materiais já existentes os quais, ao terem suas propriedades recuperadas, passam a ser novamente utilizados, fazendo com que a exploração de jazidas e materiais virgens seja reduzida. A reciclagem profunda de pavimentos, também conhecida como FDR – da sigla em inglês *Full-Depth Reclamation* – área na qual se insere o presente trabalho, vem a contribuir com esse contexto.

Diversas metodologias de dosagem internacionais e grande parte das especificações técnicas brasileiras levam em consideração, para fins de definição dos teores de projeto a serem aplicados nas misturas tipo BSM – da sigla em inglês *Bitumen Stabilized Materials* – a resistência à tração indireta (ITS, da sigla em inglês *Indirect Tensile Strength*). Esse cenário destaca a importância dessa propriedade levando em consideração esse tipo de estabilização. A nível nacional, o “banco de dados” disponível para o dimensionamento de pavimentos considerando a aplicação de misturas do tipo BSM pode ser considerado insatisfatório. Sendo assim, parece oportuno que pesquisas envolvendo o parâmetro ITS para essa categoria de material sejam desenvolvidas.

Este estudo teve como objetivo avaliar a influência da incorporação de RAP – da sigla em inglês *Reclaimed Asphalt Pavement* – na resistência à tração indireta de misturas do tipo BSM estabilizadas com emulsão asfáltica. Para atingir tal objetivo, foram adicionados dois teores de RAP nas misturas, iguais a 20% e 40%. Também foram acrescentados quatro teores de emulsão, definidos em função da granulometria dos materiais, iguais a 2,9%, 3,1%, 3,3% e 3,5%. Dessa maneira, foi possível avaliar a influência da incorporação de RAP no parâmetro ITS para os diferentes teores de ligante incorporados.

CONCEITUAÇÃO E ASPECTOS GERAIS DAS MISTURAS TIPO BSM

De acordo com a *Southern African Bitumen Association* (SABITA, 2020), o comportamento das misturas tipo BSM é bastante semelhante ao de materiais granulares não cimentados, porém com níveis significativamente maiores de coesão e reduzida sensibilidade à umidade. Normalmente, pequenas quantidades de fíler ativo, como cimento ou cal hidratada, são adicionados à mistura em conjunto com a emulsão asfáltica ou espuma de asfalto. A presença do fíler ativo acaba por auxiliar o processo de dispersão do ligante. A hidratação do cimento ou da cal reduz o teor de umidade na mistura e ajuda a resistir à desagregação precoce causada pela ação do tráfego. Também pode ser observado um ganho de resistência gradual ocasionado pelas forças de ligação existentes entre o ligante e os agregados, efeito esse que é aprimorado pela presença do fíler ativo, proporcionando uma resistência de longo prazo aos danos provocados pela umidade (SABITA, 2020).

O documento da SABITA (2020) expõe ainda as principais características envolvidas no comportamento dos BSMs, as quais são destacadas a seguir:

- a) Os BSMs obtêm um aumento significativo na coesão quando comparados aos materiais não tratados. O ângulo de atrito interno dos BSMs é bastante semelhante ao do material não tratado;



DOI: [10.29327/1430212.49-47](https://doi.org/10.29327/1430212.49-47)

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RAP NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA DE MISTURAS DO TIPO BSM ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA

- b) Os BSMS adquirem resistência à flexão e uma certa rigidez como resultado das propriedades viscoelásticas do ligante disperso na mistura. Todavia, as partículas maiores não são revestidas pela película de ligante de forma contínua, não ficando totalmente “ligadas”. Dessa forma, os BSMS retêm as características granulares do material original, sendo sua rigidez dependente do estado de tensões e não estando propensos ao trincamento por fadiga;
- c) O ligante asfáltico fica disperso, principalmente, no entorno das partículas menores, o que acaba por encapsular e imobilizar as mesmas. Isso promove uma redução na susceptibilidade à umidade, melhorando a durabilidade dos BSMS. Uma vez que os finos estão “colados”, a tendência dos BSMS de bombear finos ao ser solicitado pelas cargas do tráfego é significativamente reduzida;
- d) De forma semelhante aos materiais granulares não tratados, a rigidez dos BSMS em uma camada de pavimento depende de alguns fatores como: a qualidade inerente do material não tratado; a densidade atingida pelo material; os teores de ligante e filer ativo adicionados e sua dispersão na mistura; o clima local (principalmente a temperatura e a precipitação) e a rigidez da camada subjacente. Importante destacar que o elevado aumento na coesão bem como a pequena variação no ângulo de atrito interno do BSM são os fatores responsáveis por permitir que o mesmo seja capaz de sustentar um maior nível de rigidez quando uma carga é aplicada;
- e) O principal mecanismo de falha dos BSMS é a deformação permanente;
- f) O comportamento dos BSMS pode variar consideravelmente e depende da qualidade do material não tratado bem como das quantidades de ligante e filer ativo aplicadas. Quando cimento em excesso é adicionado, a mistura pode acabar se comportando como um material tratado com cimento, sendo que o benefício da adição do ligante passe a ser discutível. Por esta razão, a adição de cimento deve ser limitada a 1% (em massa). Adicionalmente, existindo a presença de sílica no material não tratado, o potencial para reação pozolânica com o filer ativo precisa ser examinado.

Feita a apresentação das principais características das misturas tipo BSM, cabe um esclarecimento. O fato de a adição de cimento ser limitada a 1% não indica que o acréscimo de teores mais elevados possa ser, obrigatoriamente, prejudicial para a mistura. Essa limitação busca apenas garantir que as misturas do tipo BSM se comportem, de fato, como materiais granulares. Resultados obtidos por Andrade (2017) e Kuchiishi (2019) no ensaio triaxial de módulo de resiliência (MR) indicam que misturas contendo teores de cimento a partir de 2% não apresentam relação entre o MR e as tensões confinantes (σ_3) aplicadas assemelhando-se, dessa maneira, aos materiais cimentados. Nesse caso, eles estariam sujeitos, por exemplo, ao trincamento por fadiga. Cabe destacar que, na estabilização com emulsão, uma das principais funções do filer ativo consiste em auxiliar o processo de dispersão do ligante na mistura, diferentemente do que ocorre na estabilização com cimento, em que o ganho de rigidez é o principal benefício esperado.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os experimentos foram programados com base na metodologia de dosagem da Sabita (2020). Quanto ao conteúdo de cimento, optou-se pelo teor de 1%, destacando-se que não foi incluída no programa experimental a etapa de dosagem que versa sobre a seleção do filer ativo. Maiores



esclarecimentos sobre esse procedimento de dosagem podem ser obtidos nos estudos de Martell (2022), Martell e Núñez (2023).

Na presente pesquisa, foram utilizados dois conteúdos de RAP, iguais a 20% e 40%. O primeiro teor foi definido buscando simular a técnica da reciclagem tipo FDR em uma estrutura de pavimento com revestimento asfáltico delgado, enquanto o segundo, uma camada de CBUQ com espessura intermediária. Cabe destacar que de acordo com a *Portland Cement Association* (PCA, 2017), a reciclagem do tipo FDR é um método de reabilitação que envolve a reciclagem de um pavimento asfáltico existente (camada superficial) e sua camada inferior, transformando essa mistura reciclada em uma nova camada de base.

Além do RAP, foi incorporada às misturas brita graduada simples (BGS), simulando a camada subjacente de base. Dessa forma, as duas misturas estudadas possuem as seguintes composições: 80% BGS/20% RAP e 60% BGS/40% RAP, ambas com incorporação de 1% de cimento. Considerando uma profundidade de reciclagem de 25 cm, as misturas 80% BGS/20% RAP e 60% BGS/40% RAP equivalem, respectivamente, a uma estrutura de pavimento com 5 cm de CBUQ/20 cm de BGS e 10 cm de CBUQ/15 cm de BGS. A determinação exata dos percentuais de cada material e suas espessuras em campo deve ser feita mediante a consideração das densidades *in situ*, sendo que as estruturas aqui apresentadas podem ser consideradas aproximadas. Maiores esclarecimentos sobre esse aspecto podem ser obtidos no documento TG2 (SABITA, 2020).

MATERIAIS

Materiais Procedentes da Coleta de Campo (RAP e BGS)

A BGS, de origem granítica, foi coletada junto a um fornecedor localizado no município de Eldorado do Sul/RS. O RAP foi recolhido em um depósito localizado às margens da rodovia BR-290 (km 134), próximo ao município de Eldorado do Sul/RS. Cabe destacar que não foi possível obter informações acerca do tipo de CAP presente no RAP. Ambos os materiais foram armazenados em bombonas plásticas de 200 litros, as quais foram mantidas em um depósito fechado até que os agregados fossem ensaiados. A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados na BGS, os quais foram executados pelo próprio fornecedor do agregado.

Tabela 1. Resultados dos ensaios realizados para caracterização da BGS.

Propriedade	Normativa do ensaio	Resultado	Especificação (DNIT 141/2010-ES)
ISC	NBR 9895/17	176%	≥ 80%
Expansão	NBR 9895/17	0%	≤ 0,5%
Limite de liquidez	DNER-ME 082/94	NP	≤ 25%
Índice de plasticidade	DNER-ME 082/94	NP	≤ 6%
Equivalente de areia	DNER-ME 054/97	63,3%	> 30%
Absorção	DNER-ME 195/97	0,6%	-
Abrasão "Los Angeles"	DNER-ME 035/98	21%	≤ 55%
Índice de forma	DNIT-ME 424/20	0,8%	-

Cimento

Foi utilizado um cimento do tipo CP IV-32. A escolha da classe intermediária de resistência (32 MPa) pode ser justificada, de acordo com Fedrigo (2015), pelo fato de haver diversas experiências com o uso desse tipo de cimento em serviços de reciclagem de pavimentos. Sabita (2020) relata que podem ser utilizados diferentes tipos de cimento na estabilização de misturas a frio com emulsão asfáltica, devendo ser evitados aqueles com endurecimento rápido.



DOI: 10.29327/1430212.49-47

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RAP NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA
DE MISTURAS DO TIPO BSM ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA

Emulsão Asfáltica

Foi aplicada uma emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos de ruptura lenta, do tipo RL1C-E. Denominada Recycla RP, o ligante foi fornecido por uma empresa parceira da pesquisa. Greca Asfaltos (2021) destaca em seu portfólio de produtos que a Recycla RP está inserida na categoria das emulsões especiais, sendo seu uso recomendado para reciclagem do tipo FDR. O catálogo ainda cita que Recycla é a linha de emulsões indicada para produção de misturas a frio com utilização de até 100% de RAP, atuando diretamente na reativação das características aglutinantes do ligante. A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados na emulsão, valendo destacar que eles foram executados pelo próprio fornecedor.

Tabela 2. Resultados dos ensaios realizados para caracterização da emulsão.

Propriedade	Normativa do ensaio	Resultado	Especificação (resolução ANP nº36)	
			Mínimo	Máximo
Saybolt Furol	NBR 14491/07	25 s	-	70 s
Sedimentação	NBR 6570/16	1,6%	-	5%
Peneiração	NBR 14393/12	0,01%	-	0,1%
Carga de partícula	NBR 6567/15	Positiva	Positiva	
Resíduo seco	NBR 14376/19	60,5%	60%	-
pH	NBR 6299/12	4	-	6,5

MÉTODOS

Caracterização das Misturas (RAP + BGS + cimento + emulsão)

As curvas granulométricas foram determinadas a partir das granulometrias individuais dos agregados RAP e BGS, sendo seguidas as diretrizes constantes no método de ensaio DNER-ME 083 (DNIT, 1998). Dessa maneira, foi possível verificar se elas se encontravam dentro do intervalo preconizado pelo método de dosagem Sabita (2020).

As curvas de compactação buscaram determinar os parâmetros de moldagem ($\gamma_{dm\acute{a}x}$ e OFC, da sigla em inglês *Optimum Fluid Content*). Para isso, foram seguidas as orientações contidas no método de ensaio DNIT-ME 164 (DNIT, 2013), com algumas adaptações. Primeiramente, cabe destacar que foram eliminadas todas as partículas retidas na peneira de #19mm (3/4”), tanto no RAP quanto na BGS, não havendo a substituição dessa parcela de agregados graúdos pela fração compreendida entre as peneiras de #19mm e #4,8mm, aspecto recomendado pela normativa supracitada. De acordo com o TG2 (SABITA, 2020), quando houver material retido na peneira #20mm, o mesmo deverá ser levemente triturado até que sua totalidade passe por essa abertura, devendo essa parcela ficar retida na malha de #14mm. Na impossibilidade de reduzir o tamanho desses agregados, optou-se apenas pela eliminação da fração retida na peneira #19mm.

Os ensaios de compactação foram executados sem reuso de material, empregando-se o cilindro e o soquete grandes, sendo aplicada a energia modificada. As amostras foram secas ao ar, sendo o cimento adicionado, no teor de 1%, considerando as suas massas secas. As misturas foram produzidas de forma manual. Tradicionalmente, a obtenção das curvas de compactação é feita mediante a adição de água. Entretanto, de acordo com o TG2 (SABITA, 2020), no caso das misturas tipo BSM estabilizadas com emulsão, deve ser preparado um fluido composto por 50% de água e 50% de emulsão, devido ao fato do ligante residual também ser considerado um fluido que contribui para o processo de compactação. Para cada teor de fluido adicionado, foi determinado o peso do conjunto (molde + material compactado). Aplicando a equação (1), foi determinado o peso específico aparente seco (γ_{seco}) para cada ponto da curva de compactação.



$$\gamma_{\text{seco}} = \frac{\gamma_{\text{úmido}}}{1+FC} \quad (1)$$

Onde: γ_{seco} = peso específico aparente seco (g/cm^3); $\gamma_{\text{úmido}}$ = peso específico aparente úmido (g/cm^3); FC = teor de fluido (teor de água + emulsão).

Definição dos Teores de Emulsão Asfáltica Incorporados

O teor inicial de emulsão foi definido pela curva granulométrica das misturas. A metodologia Sabita (2020) preconiza o acréscimo de quatro teores distintos, sendo eles: teor inicial - 0,4%; teor inicial - 0,2%; teor inicial; teor inicial + 0,2%. De acordo com a metodologia de dosagem, essa etapa busca otimizar e definir o conteúdo a ser empregado no projeto final das misturas BSM.

Preparação e Compactação das Amostras

As misturas foram produzidas de forma manual, buscando-se adotar o mesmo tempo de homogeneização quando cada um dos materiais era adicionado (2 a 3 minutos). As amostras foram secas ao ar e, após a determinação das suas umidades, foi calculada a massa seca da mistura, parâmetro utilizado para determinar as quantidades de cimento e emulsão a serem adicionadas.

Importante salientar que nessa etapa não foi feita a diluição da emulsão, sendo esse processo realizado apenas na obtenção das curvas de compactação. Ainda, o primeiro insumo a ser adicionado às misturas foi a água, seguido pelo cimento e, por fim, foi feito o acréscimo da emulsão. A definição da quantidade de água a ser incorporada foi feita respeitando-se o OFC obtido através das curvas de compactação. A equação (2) apresenta essa relação, que leva em conta os teores de fluido, água, emulsão e umidade higroscópica dos agregados.

$$\text{OFC} = \text{WC} + \text{EC} + \text{HM} \quad (2)$$

Onde: OFC = teor de fluido ideal determinado na curva de compactação (%); WC = teor de água a ser adicionado (%); EC = teor de emulsão (%); HM = umidade higroscópica dos agregados (%).

Os corpos de prova foram moldados nas dimensões 150x95mm (diâmetro x altura), com auxílio de um molde tripartido, empregando-se a compactação vibratória. Foi utilizado um martelo demolidor da marca Bosch, modelo GSH 500, com uma potência nominal de 1100 W e uma energia de impacto de 7,5 J por golpe, sendo acoplada na sua extremidade uma ponteira adaptada. Inicialmente, os corpos de prova foram confeccionados em duas camadas. Todavia, foi observado que o $\gamma_{\text{dmáx}}$ não estava sendo alcançado, mesmo com o incremento no tempo de compactação aplicado. Dessa forma, os corpos de prova passaram a ser moldados em três camadas. Vale destacar que essas recomendações constam no TG2 (SABITA, 2020). Durante as moldagens, o controle do tempo de compactação, o qual variou entre 30 e 120 segundos, foi feito mediante a aferição das alturas, sendo realizado o processo de escarificação entre as camadas.

Cura Controlada das Amostras

Após a compactação, os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura controlada conforme a descrição apresentada a seguir:

- a) Finalizada a remoção dos corpos de prova dos moldes, eles foram identificados e colocados em estufa a uma temperatura de 40°C por um período mínimo de 72 horas;

DOI: [10.29327/1430212.49-47](https://doi.org/10.29327/1430212.49-47)

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RAP NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA DE MISTURAS DO TIPO BSM ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA

- b) Depois das 72 horas, os corpos de prova foram retirados da estufa e pesados, sendo suas massas individuais registradas;
- c) Todos os corpos de prova foram recolocados na estufa a 40°C por mais quatro horas e, passado esse período, o exercício de pesagem foi repetido. Como a massa de todos os corpos de prova apresentou uma diferença inferior a dez gramas (critério de aceitação), ou seja, praticamente foi atingida a constância de massa, eles foram removidos da estufa;
- d) Os corpos de prova foram então colocados sobre uma bancada até que fosse alcançada a temperatura de 25°C. Após o resfriamento ser realizado por um período mínimo de 20 horas, foram determinadas as densidades aparentes secas de cada corpo de prova;
- e) Foram excluídos das análises todos os corpos de prova que apresentaram uma densidade aparente individual superior a +/- 2,5% da média obtida para o conjunto, sendo considerado como conjunto os seis corpos de prova moldados para cada teor de emulsão incorporado;
- f) Feita a análise estatística, os corpos de prova não submetidos a imersão foram rompidos. Já a outra metade dos corpos de prova (três para cada teor de emulsão) foram colocados em um banho de imersão com água a 25°C, por um período de 24 horas. Após serem removidos da água, suas superfícies foram secas e o ensaio ITS foi realizado imediatamente.

Determinação da Resistência à Tração Indireta (ITS)

Para determinação da ITS foram moldados corpos de prova em triplicata, levando-se em consideração o teor de emulsão e o tipo de cura realizada. Dessa maneira, foram confeccionados 24 corpos de prova para cada mistura, totalizando 48 moldagens.

O ensaio para determinação da ITS foi executado de acordo com a normativa DNIT-ME 136 (DNIT, 2018), desenvolvido originalmente para misturas asfálticas. Considerando a carga de ruptura aplicada, o parâmetro ITS foi calculado mediante a aplicação da equação (3).

$$ITS = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (3)$$

Onde: ITS = resistência à tração indireta (MPa); F = carga de ruptura (N); D = diâmetro do corpo de prova (cm); H = altura do corpo de prova (cm).

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Caracterização das Misturas

As curvas granulométricas das misturas são apresentadas na Figura 1. Nela, também é possível observar a faixa granulométrica recomendada para reciclagem de materiais com incorporação de emulsão asfáltica de acordo com o TG2 (SABITA, 2020). Considerando que as granulometrias se encontram dentro dos limites propostos, não foi necessária a adição de nenhum outro tipo de agregado, sendo dispensável o processo de estabilização granulométrica. Devido ao fato de ambas as misturas apresentarem uma fração passante na peneira #4,75mm inferior a 50% e, ainda, considerando que o teor de finos (passante #0,075mm) obtido para ambas as misturas foi menor do que 4%, o teor inicial de emulsão a ser adicionado foi definido como sendo **3,3%**. Maiores detalhes sobre a definição do conteúdo inicial de emulsão podem ser obtidos nos documentos TG2 (SABITA, 2020), Martell (2022), Martell e Núñez (2023).



Daniel Wolter Martell,
Washington Peres Núñez,
Lélio Antônio Teixeira Brito

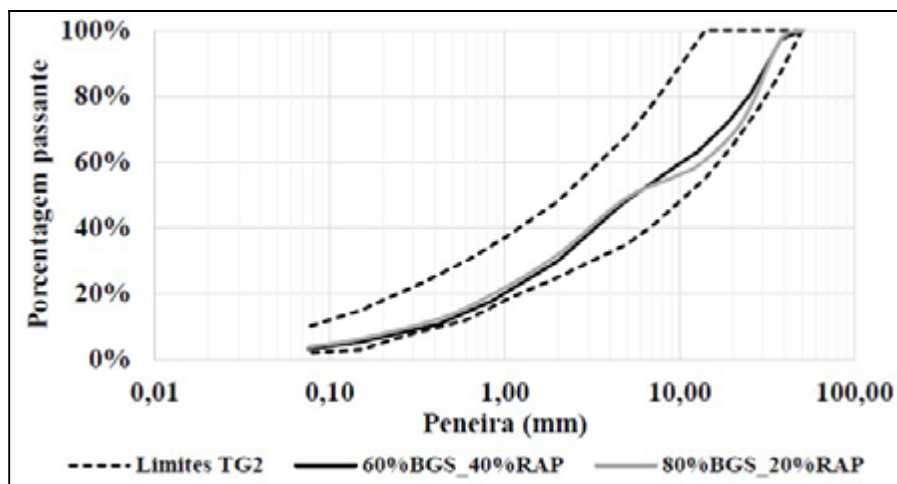


Figura 1. Curvas granulométricas das misturas.

As curvas de compactação das misturas são exibidas na Figura 2. Para fins de comparação, também foi inserida a curva do agregado tipo BGS. Destaca-se que a incorporação de RAP promoveu uma redução no $\gamma_{dm\acute{a}x.}$ e na $w_{\acute{o}t.}$ (umidade ótica) dos materiais. É possível verificar que quanto maior o teor de RAP incorporado, maior a redução observada no $\gamma_{dm\acute{a}x.}$. Esse comportamento já foi relatado por outros autores como Specht *et al.* (2013) e Fedrigo (2015), dentre outros. Com relação ao parâmetro OFC, a variação nos teores de RAP não promoveu uma influência significativa. Isso talvez possa ser explicado pelo fato de as curvas granulométricas de ambas as misturas exibirem considerável similaridade, com um conteúdo de finos praticamente idêntico (3%), fazendo com que a adição de um mesmo teor de fluido promova a máxima densificação dos materiais.

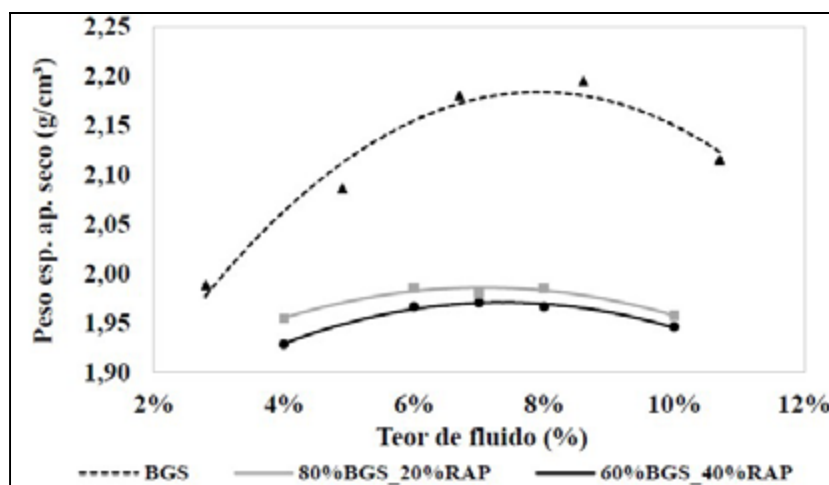


Figura 2. Curvas de compactação das misturas.

Baseado nos resultados dos ensaios de granulometria e compactação, foi possível definir os teores de emulsão e água a serem acrescentados às misturas bem como os seus parâmetros de moldagem. A Tabela 3 apresenta uma síntese dessas definições, incluindo o número de corpos de prova confeccionados e os parâmetros de moldagem do agregado tipo BGS.



DOI: 10.29327/1430212.49-47

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RAP NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA DE MISTURAS DO TIPO BSM ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA

Tabela 3. Parâmetros obtidos na etapa de caracterização das misturas.

Mistura	Tipo de cura	Nº de corpos de prova	Parâmetros de moldagem		Teores adicionados	
			OFC	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$	Emulsão	Água
80%BGS_20%RAP (1% cimento)	Seca	3	7%	1,985 g/cm ³	2,9%	4,1%
		3			3,1%	3,9%
		3			3,3%	3,7%
		3			3,5%	3,5%
		3			2,9%	4,1%
	Seca + imersão	3			3,1%	3,9%
		3			3,3%	3,7%
		3			3,5%	3,5%
		3			2,9%	4,5%
		3			3,1%	4,3%
60%BGS_40%RAP (1% cimento)	Seca	3	7,4%	1,970 g/cm ³	3,3%	4,1%
		3			3,5%	3,9%
		3			2,9%	4,5%
	Seca + imersão	3			3,1%	4,3%
		3			3,3%	4,1%
		3			3,5%	3,9%
Agregado tipo BGS	-	-	8% (w _{ót.})	2,180 g/cm ³	-	-
Total	-	48	-	-	-	-

Efeito da Incorporação de RAP na Resistência à Tração Indireta (ITS)

A figura 3 exibe os resultados da ITS em função do teor de RAP incorporado às misturas. Os dados representam a média dos corpos de prova moldados em triplicata, levando em consideração os teores de emulsão acrescentados e o tipo de cura realizado.

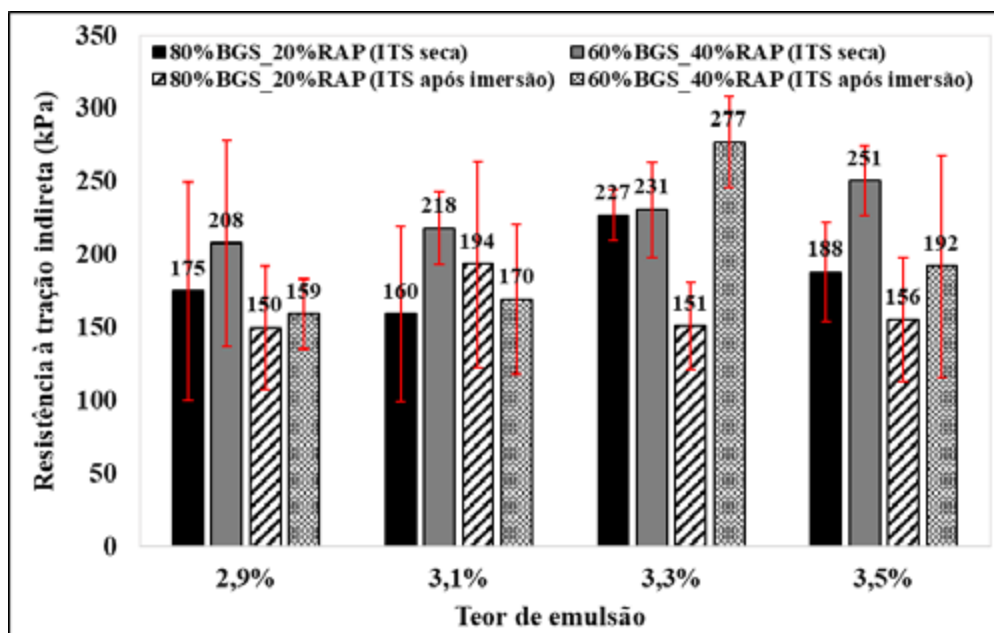


Figura 3. Efeito da incorporação de RAP na ITS das misturas.

Um primeiro aspecto a ser observado é que, no caso dos corpos de prova não submetidos à imersão, a mistura 60%BGS_40%RAP alcançou os melhores resultados, independentemente do teor de emulsão acrescentado. Isso vem ao encontro de alguns resultados observados na literatura, pois a



mistura com maior percentual de RAP, por possuir uma quantidade superior de ligante oxidado e, considerando que a emulsão utilizada nesse estudo rejuvenesce as propriedades desse insumo, é totalmente compreensível que a mistura 60%BGS_40%RAP obtenha um desempenho superior.

Considerando a cura controlada sem imersão, o maior acréscimo de ITS, de aproximadamente 36%, foi observado para o conjunto de corpos de prova moldados com 3,1% de emulsão. Os corpos de prova com 3,5% de emulsão obtiveram um ganho de 33,5%, enquanto os com 2,9% de emulsão alcançaram um aumento de 19%. Nessas três situações, os graus de compactação alcançados pelos conjuntos de corpos de prova, considerando cada condição de cura, foram relativamente próximos, com uma variação máxima de 1,7%. Para os corpos de prova moldados com 3,3% de emulsão, o acréscimo na ITS foi praticamente nulo, com um ganho de 1,8%. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de os corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP com 3,3% de emulsão terem alcançado um grau de compactação médio de 94,6%, enquanto os corpos de prova da mistura 60%BGS_40%RAP atingiram uma média de 91,4%, ou seja, uma variação de 3,2%. Isso fez com que o desempenho da mistura com menor percentual de RAP fosse alavancado, inibindo o efeito da incorporação de tal agregado frente ao parâmetro ITS. Tal situação indica que um aumento na densidade influencia de forma positiva a ITS. Aqui, cabe citar o trabalho de Jenkins; Greyling e Collings (2021), estudo o qual afirma que o aumento do conteúdo de RAP promove uma queda nos teores de projeto, devido ao melhor comportamento das misturas BSM frente ao parâmetro ITS.

No caso dos corpos de prova submetidos à imersão, a situação se manteve idêntica, com exceção do conteúdo de emulsão de 3,1%. Nesse teor específico, a mistura com menor percentual de RAP obteve um melhor desempenho. Analisando as informações de maneira mais detalhada, percebe-se que o conjunto de corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP obteve um grau de compactação médio de 93,6%, enquanto o conjunto da mistura 60%BGS_40%RAP atingiu 91,2%. Sendo assim, sabendo-se que maiores graus de compactação afetam de forma positiva a ITS, explica-se parcialmente os resultados obtidos. Ainda, considerando que os corpos de prova com menor grau de compactação possuem um maior índice de vazios ($e\%$) e, conseqüentemente, uma menor resistência aos efeitos deletérios da umidade, os mesmos tendem a sofrer uma maior influência dos danos causados pela imersão, devido ao preenchimento dos vazios pela água, aspecto que também ajuda a explicar tal situação. As conclusões obtidas no estudo de Yang *et al.* (2021) destacam que a redução do índice de vazios, ou seja, a promoção de maiores graus de compactação é uma maneira eficiente de aumentar a ITS dos materiais. Os resultados aqui obtidos corroboram essa tendência.

Também vale citar que o conjunto de corpos de prova da mistura 60%BGS_40%RAP submetidos à imersão com 3,3% de emulsão incorporada apresentou os melhores resultados de ITS. Para essa situação, foi observado um aumento de aproximadamente 83% em tal parâmetro. Avaliando o grau de compactação médio obtido para esse grupo, percebe-se que as densidades ficaram em patamares muito próximos aos demais conjuntos, não podendo ser indicada como uma razão para o melhor desempenho. Sendo assim, aparentemente, esses resultados indicam uma possível variabilidade existente no próprio processo de confecção dos corpos de prova, não sendo identificado nenhum aspecto notável que possa explicar tal comportamento. Cabe destacar que dentre os 48 corpos de prova rompidos, o maior valor obtido para ITS foi de 312 kPa.

Por fim, é importante mencionar que as barras de erro presentes na figura 3 indicam que houve uma elevada variabilidade nos resultados obtidos. Tal ocorrência sugere que, devido ao fato de os materiais aqui estudados terem sido coletados em campo, o processo de quarteamento realizado em laboratório para redução das amostras parece não ter sido eficaz para reduzir a variabilidade e,



DOI: [10.29327/1430212.49-47](https://doi.org/10.29327/1430212.49-47)

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RAP NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA DE MISTURAS DO TIPO BSM ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA

ainda, por se tratar de misturas recicladas, a variabilidade existente pode ser uma condição inerente ao próprio tipo de material utilizado.

CONCLUSÕES

Abaixo são destacadas as principais conclusões desse trabalho:

- a) Houve dificuldades para promover a densificação adequada das misturas. Dessa forma, o martelo demolidor aqui empregado parece não ser indicado para compactação de materiais similares aos desse estudo;
- b) A incorporação de RAP promoveu um aumento nos valores do parâmetro ITS. Esse comportamento foi observado para todos os teores de emulsão e para ambas as condições de cura. Considerando que a emulsão incorporada promove a reativação parcial do ligante oxidado no RAP, fazendo com que suas propriedades viscoelásticas sejam restauradas, justifica-se tal comportamento. Dessa forma, o RAP pode ser considerado um agregado nobre, devendo a sua reutilização ser cada vez mais estimulada.
- c) Os resultados obtidos indicam que o grau de compactação influencia de forma significativa o parâmetro ITS. Sendo assim, é imprescindível que uma densificação adequada das misturas tipo BSM seja alcançada para o seu adequado comportamento. Nesse contexto, cabe destacar que existe uma variabilidade inerente no processo de compactação vibratória, sendo observadas dispersões nas densidades. Sendo assim, embora o método de compactação do tipo vibratório seja aquele aplicado em campo, o autor gostaria de destacar que, do ponto de vista exclusivamente laboratorial, a compactação giratória tende a resultar em uma menor variabilidade na etapa de moldagem, haja vista o monitoramento contínuo da altura e densidade dos corpos de prova realizado pelo equipamento giratório;
- d) Devido ao fato de os materiais aqui estudados terem sido coletados em campo, o processo de quarteamento realizado em laboratório para redução das amostras parece não ter sido eficaz para reduzir a variabilidade. Tal fato fez com que as densidades obtidas pelos corpos de prova fossem relativamente distintas, situação que afetou de forma negativa as análises aqui realizadas, que buscaram considerar exclusivamente o efeito da incorporação de RAP no parâmetro ITS. Para pesquisas futuras, a fim de mitigar a influência da variabilidade e as consequentes diferenças nas densidades, o autor sugere que as amostras sejam preparadas dentro do laboratório, com a pesagem específica dos materiais em cada uma das peneiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, L.R. **Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado**. 2017. 179 p. Thesis (Master in Transportations Engineering), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14491:2007**: Emulsões asfálticas – Determinação da viscosidade Saybolt FuroI. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6299:2012**: Emulsões asfálticas – Determinação do pH. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14393:2012**: Emulsões asfálticas – Determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6567:2015**: Ligantes asfálticos – Emulsões asfálticas – Determinação da carga de partícula. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6570:2016**: Ligantes asfálticos – Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas. Rio de Janeiro, 2016.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895:2017**: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14376:2019**: ligantes asfálticos – Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas – Métodos expeditos. Rio de Janeiro, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – análise granulométrica**. DNER-ME 083/98. Rio de Janeiro, 5 p. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. DNER-ME 035/98. Rio de Janeiro, 6 p. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**. DNER-ME 195/97. Rio de Janeiro, 6 p. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Equivalente de areia**. DNER-ME 054/97. Rio de Janeiro, 10 p. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos – determinação do limite de plasticidade**. DNER-ME 082/94. Rio de Janeiro, 3 p. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio**. DNIT 424/2020-ME. Rio de Janeiro, 9 p. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. DNIT 136/2018-ME. Rio de Janeiro, 9 p. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. DNIT 164/2013-ME. Rio de Janeiro, 7 p. 2013.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland: definição das bases para um método de dosagem**. 2015. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2015.

GRECA ASFALTOS. **Portfólio de produtos**. (2021). 36 p. Disponível em: <https://www.grecaasfaltos.com.br/wp-content/conteudos/catalogo-produtos-greca-asfaltosweb.pdf>. Acesso em: 30 set. 2022.

JENKINS, K. J.; GREYLING, A. H.; COLLINGS, D. C. **Bitumen Stabilization of Base Layers for Pavement Rehabilitation Reaches Greater Heights**. 2021. International Airfield and Highway Pavements Conference 2021. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784483510.024>. Acesso em: 29 jul. 2021.

KUCHIISHI, A. K. **Mechanical Behavior of Cold Recycled Asphalt Mixtures**. 2019. 191 p. Master Thesis (Engineering), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

MARTELL, D. W. **Reciclagem Profunda de Pavimentos Asfálticos com Emulsão: Aplicação da Metodologia de Dosagem Sul-Africana a Nível Nacional**. 156 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura. Porto Alegre, BR-RS, 2022.

MARTELL, D. W.; NÚÑEZ, W. P. **Dosagem de Misturas a Frio Recicladas com Emulsão: Aplicação da Metodologia Sul-Africana a Nível Nacional**. Anais do 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR). Anais da 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv). 2023. Foz do Iguaçu/PR. Disponível em: <https://rapvenacor.com.br/anais/2023/TT048.pdf>. DOI: 10.29327/1304307.48-50.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Guide to full-depth reclamation (FDR) with cement**. Report N° SR1006P, 2017.

SOUTHERN AFRICAN BITUMEN ASSOCIATION. **Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials**. Third Edition. July, 2020.

SPECHT, L. P.; PIRES, G. M.; VITORELO, T.; HIRSH, F.; CRONST, F.; BERGMANN, E. C.; TIEFENSEE, M. D. **Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo**. Anais da 42ª Reunião Anual de Pavimentação. 2013. Gramado/RS, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/273980399>. Acesso em: 8 ago. 2022.

YANG, W.; OUYANG, J.; MENG, Y.; HAN, B.; SHA, Y. **Effect of curing and compaction on volumetric and mechanical Properties of cold-recycled mixture with asphalt emulsion under diferente cement contents**. Construction and Building Materials 297, 123699. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123699>. Acesso em: 23 jun. 2021.



IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO

Igor Sieczkowski Moreira¹; Leonardo Lunkes Wagner¹; Mônica Regina Garcez¹; Gracieli Bordin Colpo² & Lélío Antônio Teixeira Brito¹

RESUMO

Visando o uso de práticas sustentáveis, o material fresado de pavimento, ou RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), pode ser reutilizado na produção de materiais estabilizados com emulsão de asfalto (*Bitumen Stabilized Materials – BSM*), possibilitando seu retorno à rodovia. A BSM vem ganhando espaço no Brasil e auxilia na redução da pegada ambiental por ser um material de aplicação a frio e com possibilidade de incorporação de elevados valores de RAP. Este trabalho objetiva quantificar os impactos ambientais oriundos da produção de BSM, a partir de uma análise de ciclo de vida, visando identificar oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de seu processo produtivo. Para tanto, utilizou-se o software OpenLCA e a base de dados Ecoinvent 3.7.1, estando o escopo restrito aos módulos A1, A2 e A3, correspondente à fase de produção dos materiais, conforme proposto pela norma ISO 21930 (2017). O método utilizado foi o ReCiPe *endpoint* (H, A), cujos indicadores apresentam os impactos ambientais agregados nas categorias de saúde humana, biodiversidade e escassez de recursos. Os resultados demonstraram que o esgotamento de combustíveis fósseis, devido majoritariamente ao transporte de materiais, é o principal impacto ambiental da BSM analisada. Assim, verifica-se também que os impactos estão diretamente relacionados à emissão de CO₂. Portanto, uma oportunidade de melhorar o desempenho ambiental da produção de BSM é a alternância para combustíveis oriundos de fontes renováveis, utilização de bioligantes ou a substituição da frota de veículos antigos por novos menos poluentes.

PALAVRAS-CHAVE: ESG; Materiais estabilizados; Reciclagem de pavimentos; Transporte de materiais; Fresado.

ABSTRACT

Aimed at sustainable practices, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), can be reused in the production of Bitumen Stabilized Materials (BSM), enabling its return to the highway. BSM is gaining ground in Brazil and assists in reducing the environmental footprint as it is a cold-applied material with the potential to incorporate high amounts of RAP. This study aims to quantify the environmental impacts arising from the production of BSM through a life cycle analysis, seeking to identify opportunities to improve the environmental performance of its production process. For this purpose, the OpenLCA software and the Ecoinvent 3.7.1 database were used, with the scope limited to modules A1, A2, and A3, corresponding to the production phase of the materials, as proposed by the ISO 21930 (2017) standard. The method used was ReCiPe *endpoint* (H, A), whose indicators show the aggregated environmental impacts in the categories of human health, biodiversity, and resource scarcity. The results demonstrated that the depletion of fossil fuels, primarily due to material transportation, is the main environmental impact of the analyzed BSM. Thus, it is also evident that the impacts are directly related to CO₂ emissions. Therefore, an opportunity to improve the environmental performance of BSM production is switch to fuels from renewable sources, the use of bio-binders, or the replacement of old vehicles with newer, less polluting ones.

KEY WORDS: ESG; Stabilized materials; Pavement recycling; Material transportation; RAP.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, e-mail: igor.moreira@ufrgs.br; leonardo.lunkes@ufrgs.br; monica.garcez@ufrgs.br; lelio.brito@ufrgs.br

² Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, e-mail: gracieli.colpo@pucrs.br



INTRODUÇÃO

Uma das principais técnicas de recuperação de pavimentos envolve a fresagem do revestimento asfáltico em conjunto com parte da base, também conhecido como *Full Depth Reclamation* (FDR). O material fresado é denominado no inglês de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), e consiste no resíduo da camada superficial de concreto asfáltico (CA). Frequentemente o RAP é descartado em local de aterro temporário, não sendo ideal do ponto de vista ambiental por diversas questões, inclusive pelo aumento de transporte necessário para seu posterior processamento.

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por meio da resolução nº14/2021 (DNIT, 2021), dispõe que todos os projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias deverão incluir o reaproveitamento do RAP eventualmente produzido no empreendimento, podendo este ser aplicado nas camadas do pavimento a serem construídas ou na execução de novos concretos asfálticos.

Segundo Dias *et al.* (2023), a pesquisa e aplicação de camadas de base compostas por materiais asfálticos reciclados, estabilizados com emulsão asfáltica, tem sido explorada em diversas configurações no Rio Grande do Sul. Tais misturas são internacionalmente conhecidas como *Bitumen Stabilized Materials* (BSM).

Moreira, Correia e Pereira (2006) afirmam a existência de estudos recentes demonstrando que técnicas de reciclagem a frio, como a BSM, se mostram vantajosas no ponto de vista de economia de energia e proteção ambiental. Porém, a técnica de materiais estabilizados por asfalto, como o próprio nome já diz, é composta por materiais derivados do petróleo, além da possível adição, por exemplo, de cimento Portland. Sendo assim, mesmo que este material seja frequentemente relacionado à redução de impactos ambientais, o seu processo produtivo não é isento de danos ambientais, havendo necessidade de sua avaliação.

Neste contexto, este trabalho possui o objetivo de quantificar os impactos ambientais associados à produção de uma BSM composta por RAP, emulsão asfáltica e adição de agregados virgens e cimento Portland, a partir de uma análise de ciclo de vida (ACV), bem como identificar oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental da produção de BSM com agregados provenientes das obras de restauração de rodovias.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de estabilização de uma BSM ocorre quando a espuma de asfalto, ou emulsão asfáltica, é misturada com agregados virgens e/ou RAP (SABITA, 2020). Além do agente estabilizador, pode-se adicionar um filler ativo, como cal ou cimento. Materiais estabilizados por asfalto podem ser utilizados para a execução de pavimentos novos ou reabilitação de pavimentos antigos, e a estabilização pode ser realizada *in situ* ou em usina. No processo de reabilitação, comumente são utilizadas as técnicas de reciclagem profunda ou *overlay*.

Durante o processo executivo, a eficiência da compactação da BSM é dependente de seu teor de umidade. Grilli *et al.* (2014) demonstram que, em uma BSM composta por altos teores de umidade, inicialmente a água funciona como um lubrificante e permite a compactação efetiva. Porém, quando a energia absorvida pela pressão d'água torna-se dominante, há a diminuição da trabalhabilidade da mistura, fazendo com que a compactação perca seu efeito no intertravamento do esqueleto sólido. Por outro lado, o teor ótimo de umidade permite a obtenção do valor mínimo de volume de agregados, atingindo a saturação somente ao final do processo de compactação.



DOI: [10.29327/1430212.49-69](https://doi.org/10.29327/1430212.49-69)

IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO

Um dos principais guias sobre BSM é o TG2 - *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials*, da República da África do Sul (SABITA, 2020). O guia indica que a BSM apresenta características como significativa coesão, resistência à flexão pelo ligante disperso na mistura, baixa propensão ao trincamento quando submetido à tração, boa sensibilidade à umidade e durabilidade.

A busca por materiais inovadores, ambientalmente amigáveis e capazes de atender às demandas impostas, é essencial para garantir a qualidade dos pavimentos e o desenvolvimento sustentável. A reutilização de materiais de pavimentação, que seriam descartados ou subutilizados, está ganhando destaque nas pesquisas e nas demandas das construtoras de pavimentos rodoviários por meio de técnicas de reciclagem.

O RAP, conhecido no Brasil como fresado, é um material obtido na remoção de uma ou mais camadas do pavimento, por meio de um processo denominado de fresagem. Este material vem ganhando espaço nos processos de recuperação de pavimentos, pois apresenta uma boa granulometria e um percentual de ligante já incorporado. Em um passado recente, o fresado era descartado ou doado para prefeituras ou vizinhos de obras, pois não havia demanda para seu reaproveitamento.

A reciclagem consiste em uma técnica de reabilitação de rodovias que busca a reutilização de materiais já envelhecidos, incorporando-os em misturas com novos agregados, cimento, cal ou outros aditivos químicos (FEDRIGO, 2015; BERNUCCI *et al.*, 2022). Além disso, a execução da reciclagem pode ocorrer em campo ou em usinas, onde há um maior controle dos materiais e maior qualidade de mistura, embora exija o transporte do material até a usina (SABITA, 2020). A incorporação do fresado pode ser feita a quente ou a frio.

A utilização de agregados deve respeitar as propriedades necessárias para o tratamento bem-sucedido com o material asfáltico, incluindo características de durabilidade do agregado natural (não tratado), resistência (dureza), plasticidade, classificação, composição e características de intemperismo (SABITA, 2020).

Assim como os agregados virgens, o RAP deve ser classificado e estudado para compor a mistura de BSM. Preti *et al.* (2019) destacam que o RILEM TC237-SIB é o único protocolo de caracterização de RAP existente. O teste de coesão, desenvolvido no documento, funciona adequadamente como uma ferramenta para classificar e distinguir os diferentes tipos de RAP (PERRATON *et al.*, 2016; PRETI *et al.*, 2019). Referente especialmente à granulometria, encontra-se o dilema de se o RAP deve ser considerado como “*black rock*” (agregado negro) ou como sua granulometria original, após a extração do ligante asfáltico.

O método sul-africano de projeto de mistura trata o RAP como um agregado negro e não considera a contribuição do ligante asfáltico envelhecido na composição. Por outro lado, o procedimento de projeto de mistura, desenvolvido nos Estados Unidos, apresenta o RAP com maior porcentagem de agregados revestidos com ligante, pois seus pavimentos possuem maiores espessuras de camada betuminosa (CHANDRA, VEERARAGAVAN e KRISHNAN, 2013). Os manuais da ARRA (ARRA, 2016, 2017, 2018), bem como o Manual da Wirtgen (WIRTGEN GROUP, 2012) e o livro Pavimento Sustentável (BONFIM, 2021), consideram o RAP com sua granulometria não extraída, ou seja, como *black rock*.

Algumas agências consideram a contribuição do ligante envelhecido presente no RAP, mas a maioria trata o RAP da mesma forma que um agregado natural ou rocha negra, ou seja, o ligante é considerado inerte devido às baixas temperaturas de produção (MONDAL e KUNA, 2022). Contudo, a reativação das características aglutinantes do ligante presente no RAP pode ser obtida a



partir do aumento de temperatura, tanto dos agregados virgens, quanto do próprio RAP, e do aumento do tempo de mistura (MADRIGAL *et al.*, 2017).

Com relação ao aditivo de filler ativo, diferentes tipos podem ser utilizados em materiais estabilizados por ligantes, como cimentos (não recomendado os de cura rápida), cal hidratada, cinza volante e escória de alto forno, sendo apenas alguns dos principais exemplos. Conforme o TG2 (SABITA, 2020), o objetivo de incorporar o filler ativo na BSM é melhorar a aderência do asfalto ao agregado, melhorar a dispersão da emulsão, reduzir o índice de plasticidade dos materiais naturais, aumentar a rigidez da mistura e a taxa de ganho de resistência, acelerar a cura da mistura compactada e auxiliar na ruptura da emulsão.

Porém, o comportamento de materiais estabilizados com ligante varia significativamente dependendo da qualidade do material não tratado e da quantidade de asfalto e carga ativa aplicada. Assim, a quantidade de cimento Portland deve ser limitada para evitar a diminuição da flexibilidade das misturas (YAN *et al.*, 2017). Quando a adição é excessiva, o material se comporta mais como material tratado com cimento Portland e o benefício da adição de emulsão asfáltica é discutível. Por esta razão, essa adição é limitada a 1% em massa (BONFIM, 2021; SABITA, 2020; WIRTGEN GROUP, 2012).

Meneses, Vasconcelos e Bernucci (2022) demonstram que o tipo de filler, mesmo em pequenas porcentagens (1%), afeta o comportamento mecânico de misturas de asfalto reciclado a frio. A adição de um baixo teor de cimento Portland ou cal hidratada produz um comportamento semelhante ao de um material granular, com rigidez dependente do estado de tensões. Em níveis baixos de adição, a cal apresenta melhor desempenho em termos de aumento da rigidez e menor dependência da tensão confinante.

Com o cimento Portland dosado em baixas quantidades, os produtos de hidratação se dispersam no interior dos filmes de ligante asfáltico, aumentando a viscosidade da mistura e melhorando a resistência às deformações permanentes (GRAZIANI *et al.*, 2016). Com o aumento do teor de cimento Portland, a estabilidade à umidade, a estabilidade em alta temperatura e a resistência das misturas recicladas à frio aumentam, enquanto a resistência à fissuração em baixa temperatura inicialmente aumenta e depois reduz (YAN *et al.*, 2017).

Os mecanismos de cura não ocorrem imediatamente após a compactação, mas são graduais e podem levar semanas ou meses. Por exemplo, a taxa de quebra da emulsão asfáltica depende do tipo e conteúdo do emulsificante, do valor do pH dentro da mistura e da presença de partículas finas (ou seja, carga ou cimento Portland). Por outro lado, a taxa de perda de umidade está estritamente relacionada às condições de contorno das camadas recicladas, como temperatura e umidade relativa. Além disso, como as reações de hidratação do cimento Portland requerem a presença de água, o uso de cimento acelera o processo de cura da emulsão asfáltica por reduzir a quantidade de água livre (GRAZIANI *et al.*, 2016).

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

A estrutura metodológica aplicada neste estudo segue os requisitos para uma análise do ciclo de vida, conforme proposto pela norma técnica NBR ISO 14040 (ABNT, 2009). De acordo com a referida norma, a ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais (por exemplo, uso de recursos e as consequências de liberações para o meio ambiente) ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final.



DOI: 10.29327/1430212.49-69

IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO

Um estudo de ACV é composto pela definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados.

Para a realização da modelagem de análise de ciclo de vida e a obtenção dos impactos ambientais causados pela produção de BSM, utilizou-se o *software* de acesso livre openLCA v.2.0.3 em conjunto com a base de dados Ecoinvent 3.7.1. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representa esquematicamente o cenário modelado, contendo os cinco fluxos de saída escolhidos no programa. Os fluxos 1 a 4 são equivalentes à produção dos materiais utilizados na mistura, enquanto o fluxo “X” equivale à mistura dos quatro produtos anteriores, resultando na BSM.

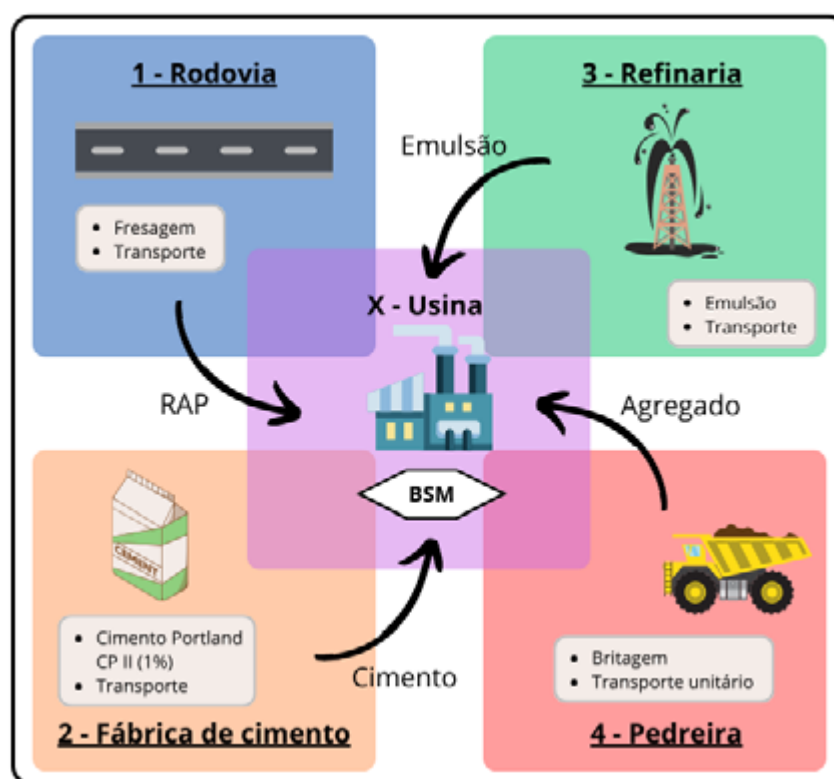


Figura 1. Esquema do fluxo de produção da BSM (AUTORES, 2024).

Escopo

Conforme os requisitos da NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), e seguindo os fluxos designados pela ISO 21930 (2017), o escopo para estudo foi assim definido:

- Unidade declarada: 100 toneladas de BSM;
- Fronteiras do sistema: análise do berço ao portão (*cradle-to-gate*) com os módulos mandatórios para uma declaração ambiental de produto (DAP), conforme sugerido pela ISO 21930 (2017):
 - Materiais (A1): faz referência a extração e produção das matérias-primas;
 - Transporte (A2): indica o transporte destas matérias-primas até a usina;
 - Produção (A3): considera a energia despendida para a mistura das matérias-primas, dando origem ao produto BSM;



- Procedimentos de alocação: alocação de recursos em massa;
- Tipos de impactos avaliados: método ReCiPe *Endpoint* (H, A);
- Fonte de dados:
 - *Foreground*: traço das misturas, energia de equipamentos na usina e em campo e distâncias de transporte;
 - *Background*: base de dados Ecoinvent.

Construção do inventário

A ISO 21930 (2017) apresenta de forma esquemática as etapas genéricas do ciclo de vida de uma estrutura de pavimento. Neste estudo, o escopo foi delimitado nos módulos A1, A2 e A3, correspondentes a fase de produção dos materiais, mandatória para a publicação das DAP.

O módulo da matéria-prima (A1) corresponde à produção do RAP, cimento Portland, emulsão asfáltica e agregados; o módulo do transporte (A2) corresponde às distâncias percorridas pelas matérias-primas até a usina (campo-usina, refinaria-usina, fábrica de cimento-usina e pedreira-usina); e o módulo de produção (A3) corresponde à operação da usina para a produção da mistura de BSM.

As discriminações dos processos utilizados em cada fluxo de saída, bem como as quantidades, unidades e itens da base de dados, estão apresentados na Tabela 1.

O valor de consumo energético da operação de fresagem, constante na Tabela 1, foi calculado com base nas informações fornecidas pelo DNIT através do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO). A composição escolhida possui o código 4011479, denominada de “fresagem contínua de revestimento asfáltico”, referente ao estado do Rio Grande do Sul para o mês de abril de 2023.

Quanto a energia para mistura da emulsão e da BSM, ambas foram calculadas com base em informações fornecidas por empresas brasileiras.

A quantidade de material foi calculada para a produção de 100 toneladas de BSM, cujo traço foi adaptado da pesquisa de Dias *et al.* (2023), dimensionado conforme metodologia TG2 para um pavimento brasileiro, e é composto de 43% de agregado virgem, 54% de RAP, 1% de cimento Portland e 2% de emulsão asfáltica (60% de ligante asfáltico e 40% de água).

No cenário modelado, considerou-se que a rodovia submetida ao processo de recomposição está localizada no estado do Rio Grande do Sul. Para o cálculo das distâncias de transporte foram consideradas as principais empresas fornecedoras de materiais da região. Tomando como referência a usina da BSM, as distâncias consideradas até o campo (rodovia), fábrica de cimento Portland e distribuidora de emulsão asfáltica, são respectivamente de 50 km, 250 km e 280 km.

O cálculo da distância percorrida pela fresadora foi baseado em sua capacidade de fresagem. Um equipamento comumente utilizado em obras de reabilitação é capaz de realizar a fresagem de uma faixa de 1,00 m de largura e 20 cm de profundidade. Assim, é possível calcular o volume fresado em função da distância percorrida. O volume pode ser convertido para peso a partir do peso específico do RAP, equivalente a 2069 kg/m³. Por fim, para o transporte da fresadora, admitiu-se um peso de 14 toneladas.



DOI: 10.29327/1430212.49-69

IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO

Tabela 1. Descrição dos fluxos de produção da BSM (AUTORES, 2024).

Fluxo de saída	Fluxo de entrada	Qnt.	Un.	Módulo	Ecoinvent
RAP	Energia de fresagem	155,69	kWh	A1	Diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine cut-off, U – GLO.
	Distância percorrida pela fresadora	3,51	t.km	A1	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U – RoW.
	Transporte da fresadora (usina-campo + campo-usina)	1400	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U – RoW.
	Transporte do material fresado (campo-usina)	2700	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U – RoW.
Cimento	Cimento CP II	1,00	t	A1	Cement, limestone 6-10% cement production, limestone 6-10% cement limestone 6-10% Cut-off U – BR
	Transporte (fábrica-usina)	250	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U – RoW.
Emulsão	Ligante asfáltico	2,00	t	A1	Pitch production, petroleum refinery operation pitch Cutoff, U – BR.
	Água	1,33	t	A1	Tap water tap water production, conventional treatment tap water Cut-off U-BR.
	Energia para mistura	8,21	kWh	A3	Electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-Southern grid.
	Transporte (refinaria-usina)	933,33	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U – RoW.
Agregado	Britagem	43,00	t	A1	Gravel, crushed gravel production, crushed gravel crushed Cutoff U – BR
	Transporte unitário dentro da usina	43,00	t.km	A2	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, U – RoW.
BSM	RAP	54,00	t	A1	Fluxo de saída – RAP.
	Cimento	1,00	t	A1	Fluxo de saída – Cimento.
	Emulsão	2,00	t	A1	Fluxo de saída – Emulsão.
	Agregado	43,00	t	A1	Fluxo de saída – Agregado.
	Energia para mistura	43,76	kWh	A3	Electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR-Southern grid.



Avaliação dos Impactos

Para a avaliação dos impactos ambientais, utilizou-se o método ReCiPe *endpoint* (H, A), desenvolvido pelo *National Institute for Public Health and Environment* (HUIJBREGTS *et al.*, 2017). O ReCiPe possui fatores de caracterização nos níveis *midpoint* e *endpoint*. No *midpoint*, os fatores de caracterização estão alocados entre a causa e o impacto observado, normalmente no ponto em que o mecanismo ambiental é idêntico para cada fluxo ambiental atribuído a essa categoria de impacto (GOEDKOOPE *et al.*, 2009). Os fatores de caracterização do *endpoint* refletem impactos nas três principais áreas de proteção: saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos (HAUSCHILD e HUIJBREGTS, 2015).

Cada nível do ReCiPe pode ser avaliado a partir de três perspectivas culturais diferentes: *Individualist* (I), *Hierarchist* (H) e *Egalitarian* (E). A primeira visa o curto prazo, é otimista em relação à tecnologia, valoriza a iniciativa individual do mercado e considera a natureza como resiliente. A segunda considera a natureza como parcialmente tolerante, sendo um modelo de consenso comumente encontrado em estudos científicos. A terceira perspectiva trabalha no longo prazo, visa as necessidades do grupo acima das individuais e considera a natureza como frágil (HUIJBREGTS *et al.*, 2017).

Neste trabalho optou-se pelo nível *endpoint* sob a perspectiva hierarquista média (H, A). Esta escolha foi feita em função de os resultados do *endpoint* serem expressos nas três principais áreas de proteção, de modo a facilitar o entendimento dos fatores de impacto do produto analisado. Ademais, a visão hierarquista foi escolhida por ser um consenso na comunidade científica.

No *endpoint*, a saúde humana é avaliada em anos de vida ajustados por incapacidade, equivalente a anos perdidos ou que uma pessoa está incapacitada devido a doenças ou acidentes; para a qualidade do ecossistema, a unidade utilizada é a perda local de espécies integrada ao longo do tempo (ano-espécie); para a escassez de recursos a unidade é o dólar, representante do custo adicional envolvido na extração futura de recursos fósseis e minerais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 consta a pontuação de impactos ambientais, para cada categoria, obtida a partir da análise de *endpoint* (H, A). A representação dos impactos por barras acumuladas, por grupo analisado, indica que o grupo mais impactado são os recursos naturais, seguido pela saúde humana e qualidade do ecossistema.

A categoria de recursos naturais engloba os recursos fósseis e minerais, os quais provocam impactos no aumento do custo de extração e custo de energia do óleo/gás/carvão (HUIJBREGTS *et al.*, 2017). Conforme os dados apresentados na Tabela 2, 94% do dano nos recursos naturais é provocado pelo esgotamento de recursos fósseis. Esse resultado é esperado, visto que a maioria das atividades realizadas (transporte, mistura e fresagem) utilizam combustível fóssil como fonte de energia.



DOI: 10.29327/1430212.49-69

IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO

Tabela 2. Impactos por categoria - ReCiPe *Endpoint* (AUTORES, 2024).

Grupo	Categoria de impacto	Pontuação	Representação por barra
Qualidade do ecossistema	Ocupação de terras agrícolas	2,08	
	Mudanças climáticas, ecossistemas	41,63	
	Ecotoxicidade de água doce	0,01	
	Eutrofização de água doce	0,01	
	Ecotoxicidade marinha	0,00	
	Transformação natural de terras	7,61	
	Acidificação terrestre	0,20	
	Ecotoxicidade terrestre	0,17	
	Ocupação urbana de terras	2,91	
	Total	54,63	
Saúde humana	Mudanças climáticas, saúde humana	65,87	
	Toxicidade humana	5,09	
	Radiação ionizante	0,11	
	Depleção de ozônio	0,05	
	Formação de material particulado	31,29	
	Formação de oxidante fotoquímico	0,23	
	Total	102,64	
Recursos	Esgotamento de combustíveis fósseis	225,21	
	Esgotamento de metais	14,39	
	Total	239,60	
Total geral		396,86	

A categoria de saúde humana é composta pelos impactos de material particulado, formação/esgotamento da camada de ozônio, radiação ionizante, toxicidade humana, aquecimento global e uso d'água, que são agregados em termos de aumento de doenças respiratórias, câncer, desnutrição e outras doenças (HUIJBREGTS *et al.*, 2017). Neste estudo, os indicadores mais afetados foram os de mudanças climáticas e formação de materiais particulados. Ambos relacionados direta ou indiretamente com a emissão de CO₂ a partir da queima de combustíveis fósseis.

A categoria de qualidade do ecossistema é formada pelos impactos de aquecimento global, uso d'água, ecotoxicidade/eutrofização d'água doce e marinha, formação da camada de ozônio, ecotoxicidade/acidificação terrestre, uso/transformação da terra, agregados em termos de dano a espécies de água doce, marinha e terrestre (HUIJBREGTS *et al.*, 2017). Para a produção da BSM em análise, conforme apresentado na Tabela 2, os indicadores de maior impacto nesta categoria são as mudanças climáticas e a transformação natural de terras. Novamente, as mudanças climáticas estão ligadas à emissão de CO₂. Com relação aos impactos de transformação, estes são provenientes da exploração de pedreiras e petróleo.

Conforme visto, a produção de gás carbônico está presente de diversas formas nos fluxos considerados para a produção da BSM. De acordo com a Tabela 1, existem seis atividades de



transporte, cujo principal meio de poluição é a queima de diesel; para a produção do RAP há também a queima do diesel para o funcionamento da máquina fresadora; para o cimento, existe a emissão de CO₂ pela queima do material no processo produtivo; e para a emulsão, na produção do ligante asfáltico, há a emissão de CO₂ pela operação da refinaria de petróleo. Em todos estes casos há o esgotamento de recursos naturais, visto que o diesel e o ligante asfáltico são subprodutos do petróleo.

A Tabela 3 apresenta as quantidades de gás carbônico, em massa, geradas por categoria, conforme os resultados da simulação realizada neste estudo.

Tabela 3. Emissão de gás carbônico por categoria (AUTORES, 2024).

Fonte de emissão	CO ₂ (kg)	Porcentagem
Biogenética	89,78	3,8%
Fóssil	2250,29	95,8%
Transformação de terras	6,28	0,3%
Estoque de solo ou biomassa	1,43	0,1%
Total	2347,77	100%

A Tabela 3 corrobora o fato de os combustíveis fósseis serem um ponto crítico da BSM sob o ponto de vista ambiental. Essa fonte corresponde a 95,8% do total no processo produtivo do material. De acordo com as análises anteriores, o transporte de materiais é o modo mais frequente de combustão de recursos fósseis. Sendo assim, identifica-se o transporte de materiais como a principal fonte emissora de CO₂ e principal meio gerador de impactos ambientais na produção da BSM analisada. Souza (2017) apresentou uma ACV para a avaliação da construção de pavimentos convencionais. Seus resultados ressaltaram que o transporte também desempenha um papel significativo nas emissões, corroborando com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Para facilitar o entendimento das dimensões das emissões do produto, os resultados foram comparados com as emissões de veículos brasileiros. Um carro produz em média 191,4 g de CO₂ por km percorrido (CARVALHO *et al.*, 2017). A produção de 100 toneladas de BSM gera uma emissão total de 2347,77 kg de CO₂. Assim, seria necessário que um veículo de passeio percorresse 12.266 km para equiparar as emissões de carbono com o processo produtivo de 100 toneladas deste material.

CONCLUSÕES

É importante salientar que uma análise de ciclo de vida é sensível ao contexto. Portanto, as conclusões obtidas são restritas ao cenário analisado, não sendo possível fazer generalizações, devido principalmente às distâncias de transporte específicas para cada região.

Os resultados demonstram que o esgotamento de combustíveis fósseis é o principal impacto ambiental do processo produtivo da BSM analisada. Dentre as diferentes fontes, identificou-se o transporte de materiais como o principal meio para a exaustão deste recurso. Ademais, a queima de combustíveis resulta na emissão de gás carbônico, levando à conclusão de que este é um dos fatores chave na análise de impactos ambientais da BSM.

Assim, as longas distâncias de transporte, presentes no cenário modelado, são decisivas para os resultados observados. Porém, vale ressaltar que este é um cenário comum no dia a dia, visto que em muitos casos a rodovia a ser recuperada está distante da usina de BSM, fábrica de cimento e



DOI: [10.29327/1430212.49-69](https://doi.org/10.29327/1430212.49-69)

IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO DE ASFALTO

refinaria de emulsão. Um cenário ideal seria composto por um ambiente em que a usina, fábrica e refinaria estejam localizadas no mesmo lugar, havendo a necessidade apenas de transporte até o local de aplicação do material. Porém, entende-se que a configuração de locação destes pontos é uma condição pré-estabelecida, havendo dificuldades técnicas e operacionais para alteração. Portanto, como solução para mitigar os impactos ambientais, pode-se avaliar qual dos componentes da mistura de BSM apresentam maior momento de transporte para uma tentativa de otimização da dosagem da BSM, visando diminuir o impacto causado pelo transporte. Além disto, possíveis alternativas de longo prazo são a alternância para combustíveis oriundos de fontes renováveis, utilização de bioligantes ou a substituição da frota de veículos antigos por novos, menos poluentes. A simulação considerou veículos que seguem a norma Euro 5 de limite máximo de emissão de poluentes veiculares. Porém, sabe-se que já existem veículos no padrão Euro 6, com critérios de emissão ainda mais rigorosos e menos poluentes.

Como sugestão de trabalhos futuros, novos cenários podem ser avaliados, com enfoque em simular diferentes distâncias, visando quantificar a parcela de impacto do transporte, diferentes traços de BSM, procurando conciliar desempenho e proteção ambiental, e diferentes configurações de veículo, de forma a explorar a viabilidade da alteração da frota veicular. Além disso, é possível realizar simulações no nível *midpoint*, visando obter resultados quantitativos dos diversos poluentes envolvidos no processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão das bolsas de estudo e produtividade respectivamente ao primeiro autor e à terceira autora, à CAPES pela bolsa de estudo do segundo autor, bem como ao Laboratório de Pavimentação da UFRGS, que permitiu a execução do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Full Depth Reclamation (FDR) Using Cement or Cement Kiln Dust (CKD) Stabilizing Agent FDR202. v. 60137, n. 630, 2016.
- ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Cold Recycling Using Foamed (Expanded) Asphalt Recycling Agent (CR202). Asphalt Recycling & Reclaiming Association, v. 60137, n. 630, 2017.
- ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent FDR201A. v. 60137, n. 630, 2018.
- BERNUCCI, L.B. et al. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 2ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.
- BONFIM, V. Pavimento Sustentável. São Paulo: Exceção Editorial, 2021.
- CARVALHO, A.L. et al. Diagnóstico das Emissões de CO₂ a Partir dos Deslocamentos dos Estudantes da Universidade de Brasília. Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia. 2017.
- CHANDRA, R.; VEERARAGAVAN, A.; KRISHNAN, J.M. Evaluation of Mix Design Methods for Reclaimed Asphalt Pavement Mixes with Foamed Bitumen. Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 104, p. 2–11, dez. 2013.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Resolução nº 14/2021, de 08 de julho de 2021. Dispõe sobre o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) nas obras de restauração,



adequação de capacidade e ampliação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Brasília/DF, 2021.

DIAS, C.R.C. et al. Bitumen Stabilized Materials as Pavement Overlay: Laboratory and Field Study. *Construction and Building Materials*, v. 369, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130562>.

FEDRIGO, W. Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento Portland: Definição das Bases Para um Método de Dosagem. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

GOEDKOOP, M. et al. ReCiPe 2008: A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at The Midpoint and Endpoint Levels. 1ª ed. Report i: characterization. The Netherlands: Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2009.

GRAZIANI, A. et al. Effect of Curing on The Physical and Mechanical Properties of Cold-Recycled Bituminous Mixtures. *Materials and Design*, v. 95, p. 358–369, 2016.

GRILLI, A. et al. Análise Volumétrica de Misturas Asfálticas Recicladas a Frio Por Meio de Compactador Giratório. 21º Encontro de Asfalto. Rio de Janeiro, Brasil. 2014.

HAUSCHILD, M.Z.; HUIJBREGTS, M.A.J. Introducing Life Cycle Impact Assessment. In: *Life Cycle Impact Assessment*. Springer, 2015.

HUIJBREGTS, M.A.J. et al. ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level. In: *Life Cycle Assess 22*, p. 138–147. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 21930: Sustainability in Building Construction – Environmental Declaration of Building Products. Geneva, 2017.

MADRIGAL, D.P. et al. Effect of Mixing Time and Temperature on Cracking Resistance of Bituminous Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001831](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001831).

MENESES, J.P.C; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L.L.B. Stiffness Assessment of Cold Recycled Asphalt Mixtures – Aspects Related to Filler Type, Stress State, Viscoelasticity, and Suction. *Construction and Building Materials*, v. 318, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126003>.

MONDAL, P.G.; KUNA, K.K. Mix Design Considerations for Foamed Bitumen Stabilized Materials: A Review. *Construction and Building Materials*, v. 326, fev., p. 126783, 2022.

MOREIRA, J., CORREIA, A.G.; PEREIRA, P.A. Contribuição Para a Reutilização de Material Fresado em Camadas Estruturais de Pavimento, 2006.

PERRATON, D. et al. Tests Campaign Analysis to Evaluate the Capability of Fragmentation Test to Characterize Recycled Asphalt Pavement (RAP) Material. In 8th RILEM international Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. p. 965–976. Dordrecht: Springer. 2016.

PRETI, F. et al. Application and Validation of The Cohesion Test to Characterize Reclaimed Asphalt Pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 20(sup1), S434–S445. 2019.

SABITA. Technical Guideline (TG2): Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita). 3ª ed. 2020.

WIRTGEN GROUP. Reciclagem a Frio: Tecnologia de Reciclagem a Frio Wirtgen. 2012. Disponível em: <www.wirtgen.com>. Acesso em: abr. 2024.

YAN, J. et al. Early-Age Strength and Long-Term Performance of Asphalt Emulsion Cold Recycled Mixes With Various Cement Contents. *Construction and Building Materials*, v. 137, p. 153–159, 2017.

SOUZA, L. P. Uso Integrado das Ferramentas de Análise do Ciclo de Vida e de Análise do Custo do Ciclo de Vida em Pavimentação. 2017. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.



IMPACTOS AMBIENTAIS DA UTILIZAÇÃO LODO TÊXTIL EM CONCRETO ASFÁLTICO AO SER EXPOSTO A ÁGUA

Lyneker S. Moura¹; Carina L. Silva²; Ana Cecília V. da Nóbrega³ & Arnaldo M. P. Carneiro²

RESUMO

O lodo têxtil é subproduto do tratamento do efluente gerado nas lavanderias industriais, onde são realizados os processos de tingimento das peças de vestuário. Há diversos registros na literatura da incorporação de tal resíduo em materiais de construção, obtendo desempenho mecânico e ambiental satisfatórios. Foi realizada, então, a incorporação de lodo têxtil no concreto asfáltico, adicionando-o diretamente aos agregados e também, misturando-o previamente ao ligante. A adição se deu em proporções de 2 a 5% de lodo têxtil por massa total da mistura asfáltica, para ambas formas de incorporação. Com base nos parâmetros da metodologia de dosagem Marshall e da norma DNIT ES 31/2006 para CBUQ, Faixa "C", os corpos de prova com inserção de 2 e 3% apresentaram os melhores resultados. Nesse sentido, é objetivo desse estudo avaliar a imobilização do lodo têxtil nas misturas asfálticas ao serem submetidas à solubilização em água. Para realização do ensaio de solubilização, foi utilizada a metodologia proposta pela norma ABNT NBR 10006:2004. Em relação ao pH do extrato solubilizado, foram obtidos valores muito próximos ao neutro, sendo todas as soluções avaliadas ligeiramente alcalinas e atendendo aos limites normativos. Para a matéria orgânica e o molibdênio total, ocorreu apreensão de 100%, para todas amostras avaliadas. Em relação à calcita, o magnésio, sódio e o potássio, ocorreu aprisionamento de mais de 99%. Para a salinidade, foi constatada uma redução de 99% e, para a alcalinidade em CaCO₃, 98%. Portanto, é evidente que as misturas asfálticas foram eficientes na imobilização do lodo têxtil, sendo capaz, portanto, de promover a redução dos danos ambientais desse resíduo industrial.

PALAVRAS-CHAVE: Lavanderias industriais; CBUQ; Resíduos; Materiais alternativos.

ABSTRACT

Textile sludge is a byproduct of treating effluent generated in industrial laundries, where clothing dyeing processes are carried out. There are several records in the literature of incorporating such waste into construction materials, achieving satisfactory mechanical and environmental performance. Therefore, the incorporation of textile sludge into asphalt concrete was carried out, adding it directly to the aggregates and also mixing it previously with the binder. The addition was made in proportions of 2 to 5% of textile sludge per total mass of the asphalt mixture, for both incorporation methods. Based on the parameters of the Marshall dosing methodology and the DNIT ES 31/2006 standard, specimens with 2% and 3% insertion showed the best results. In this sense, the objective of this study is to evaluate the immobilization of textile sludge in asphalt mixtures when subjected to water solubilization. For the solubilization test, the methodology proposed by the ABNT NBR 10006:2004 standard was used. Regarding the pH of the solubilized extract, values very close to neutral were obtained, with all evaluated solutions being slightly alkaline and meeting regulatory limits. For organic matter and total molybdenum, 100% retention occurred for all evaluated samples. Regarding calcite, magnesium, sodium, and potassium, retention of over 99% occurred. For salinity, a 99% reduction was observed, and for alkalinity in CaCO₃, 98%. Therefore, it is evident that asphalt mixtures were efficient in immobilizing textile sludge, thus capable of promoting the reduction of environmental damage from this industrial waste.

KEY WORDS: Industrial laundries; HMA; Waste; Alternative materials.

¹ Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Pernambuco, lyneker.moura@ufpe.br.

² Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, carina.lessa@ufpe.br; arnaldo.carneiro@ufpe.br

³ Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, ana.cecilia.nobrega@ufrn.br



INTRODUÇÃO

A região Agreste de Pernambuco abriga um dos mais notáveis polos têxteis do Brasil, representando o segundo maior volume de produção nacional, o APL (Arranjo Produtivo Local) de Confecções do Agreste, que tem como principais membros os municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama. As lavanderias industriais são um elemento crucial para o setor, sendo responsáveis pelos processos de lavagem, amaciagem, tingimento, descoloração e demais processos de modificação nas peças (COMETTI *et al.*, 2016).

O efluente proveniente das lavanderias carrega cerca de 90% dos produtos químicos empregados nos procedimentos realizados, os quais são de composição heterogênea em decorrência da variedade de processos executados e dos materiais neles utilizados (SOUTO, 2017). Em muitos casos, o lançamento desse resíduo ocorre diretamente nos corpos hídricos. Tendo em vista os danos causados por esses descartes irregulares, percebeu-se a necessidade de tornar obrigatório o tratamento anterior ao rejeito. O lodo têxtil é o sólido proveniente dos tratamentos físico-químicos realizados. Apesar desses processos reduzirem ou evitarem a contaminação das porções de água, o descarte inadequado do lodo pode ocasionar danos ao solo, por exemplo, dessa forma, foi proposta a inserção do material residual em revestimento asfáltico.

Diversos autores já realizaram a incorporação de lodo têxtil para fins de imobilização em materiais da construção civil (HEREK 2012; ZANONI 2013; ZHAN e POON, 2015; AQUINO 2015; VELUMANI *et al.*, 2016; ANWAR *et al.*, 2018; HOSSAIN *et al.*, 2018; FERREIRA, 2018; ZHAN *et al.*, 2019; GOYAL *et al.*, 2019). Por meio desses, foi possível realizar a comparação entre a matriz asfáltica e outras matrizes, como argilosas e cimentícias. Em relação a inserção de resíduos em revestimento asfáltico, análises ambientais e estruturais foram realizadas em diferentes trabalhos (CHOI *et al.*, 2019; WOSZUK *et al.*, 2019; JAMSHIDI *et al.*, 2018; PUTRA JAYA *et al.*, 2018; JITSANIGAM *et al.*, 2018; AL-HDABI, 2016; PASANDÍN *et al.*, 2015; MODARRES *et al.*, 2015; BARRA *et al.*, 2014). A partir dos quais foram verificadas as principais formas de incorporação dos resíduos sólidos em revestimento asfáltico, de acordo com as características do material descartado e o comportamento esperado da mistura. Detalhes acerca do processo de inserção e dosagem do lodo têxtil em concreto betuminoso usinado à quente também já foram evidenciados por Moura (2021).

Contudo, segundo a EAPA (2023) deve-se evitar a introdução de resíduos e subprodutos de outras indústrias em misturas asfálticas que possam comprometer certos aspectos fundamentais. Condições de rolamento, durabilidade, segurança e impacto ambiental são citados como aspectos fundamentais além da relação custo-benefício, desempenho mecânico. Para tal é recomendado que seja demonstrado através de um processo de avaliação de risco, que agora e no futuro, não haverá desvantagens em relação a misturas convencionais sobretudo na questão ambiental.

Moura (2021), ao avaliar o desempenho das amostras com incorporação de 0% a 5% de lodo têxtil, por massa total da mistura, com base nos parâmetros da metodologia de dosagem Marshall e da norma DNIT ES 31/2006 para CBUQ, Faixa “C”, obteve resultados mecânicos satisfatórios, especialmente para as amostras com teores de 2% e 3%. Dessa forma, é pertinente que seja realizada a avaliação ambiental no revestimento asfáltico incorporado de lodo têxtil, visando



DOI: [10.29327/1430212.49-55](https://doi.org/10.29327/1430212.49-55)

IMPACTOS AMBIENTAIS DA UTILIZAÇÃO LODO TÊXTIL EM CONCRETO ASFÁLTICO AO SER EXPOSTO A ÁGUA

compreender a eficiência das misturas asfálticas em apreender o resíduo. De modo geral, observa-se a coesão da mistura frente a intempéries simuladas, tendo como principal agente imobilizador o ligante asfáltico que envolve as partículas constituintes das misturas asfálticas. Uma das alternativas para atestar a imobilização do resíduo em revestimento asfáltico é a solubilização dos corpos de prova.

Na solubilização, é analisada a capacidade de apreensão do material residual na mistura por meio da sua submersão em água. O presente trabalho, portanto, propõe-se a realizar a análise da imobilização do lodo têxtil em misturas asfálticas, por meio da solubilização das misturas em água.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

As análises foram realizadas com o lodo têxtil puro e com os corpos de prova asfálticos contendo o resíduo, inserido de forma úmida (misturado previamente ao ligante), às proporções de 2 e 3% em massa, e de forma seca (diretamente nos agregados), à 2%. Esses valores percentuais são relativos à massa total da mistura.

Metodologia

Para realizar o ensaio de solubilização, os corpos de prova do tipo Marshall foram levemente aquecidos e desagregados, a fim de adequá-los à granulometria recomendada em norma, passantes na peneira de 9,5 mm. Posteriormente, o material foi submetido a estufa, a uma temperatura de 42°C e, em seguida, separada a porção de 250 g, com o auxílio de uma balança com a precisão solicitada. Essa parcela foi, então, inserida em um béquer de 1500 mL, ao qual foram adicionados 1000 mL de água destilada. A seguir, a mistura foi agitada em baixa velocidade durante 5 minutos e os béqueres envolvidos com filme de PVC. As amostras ficaram em repouso por 7 dias a uma temperatura de 25 °C.

Ao final do tempo de repouso, o conteúdo dos recipientes foi filtrado, sendo realizadas análises diversas com o extrato solubilizado. Inicialmente, aferiu-se o pH das amostras e, seguidamente, foram realizadas análises químicas para compreender suas composições. Foram determinados os teores de: matéria orgânica (Tritrimetria de oxi-redução); acidez (Tritrimetria de neutralização), salinidade (Condutometria); nitrato (Espectrometria UV); fosfato (Espectrometria VIS); cálcio e magnésio (Complexometria com EDTA); sódio e potássio (Fotometria de Chama); bário, cobre, níquel, cádmio, chumbo, vanádio, zinco, antimônio, prata, cobalto e molibdênio (Espectrometria). Dessa forma, foi possível compreender a capacidade de apreensão do resíduo, total e parcial, das misturas asfálticas. Os valores obtidos foram comparados com o lodo têxtil da forma que é descartado e com o concreto asfáltico de referência (0% de lodo).

Os procedimentos experimentais foram desenvolvidos em conformidade com a norma ABNT NBR 10006:2004.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os teores dos elementos supracitados nas amostras analisadas.

Tabela 1. Análise química dos extratos solubilizados (AUTOR, 2023).

(Continua)

PARÂMETROS	LODO TÊXTIL	0% LODO	LODO SECO 2,0%	LODO CAP 2,0%	LODO CAP 3,0%	VMP ⁽¹⁾	UNIDADE
Acidez	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	-	-
Alcalinidade em CaCO₃	1482,5	12,1	32,2	30,2	20,1	-	mg/L
Antimônio Total	0,011325	<0,00010	0,00017	<0,00010	0,00012	-	mg/L
Bário Total	0,06325	0,0035	0,0058	0,0067	0,0063	0,7	mg/L
Cádmio Total	<0,00050	0,00056	0,00244	0,002	0,00468	0,005	mg/L
Cálcio Total	35	2	5	5	4	-	mg/L
Chumbo Total	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	0,01	mg/L
Cobalto Total	0,00175	<0,00010	0,00051	<0,00010	<0,00010	-	mg/L
Cobre Total	0,00795	0,00132	0,00179	0,00133	0,00081	2	mg/L
Fosfato Total	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	-	mg/L
Magnésio Total	901,5	0,6	4,2	2,4	3	-	mg/L
Matéria	150	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	-	mg/L(O ₂)



DOI: 10.29327/1430212.49-55

IMPACTOS AMBIENTAIS DA UTILIZAÇÃO LODO TÊXTIL EM
CONCRETO ASFÁLTICO AO SER EXPOSTO A ÁGUA

Orgânica							
Molibdênio Total	0,0255	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	-	mg/L
Níquel Total	0,0625	<0,0010	0,0017	0,0013	<0,0010	-	mg/L
PARÂMETROS	LODO TÊXTIL	0% LODO	LODO SECO 2,0%	LODO CAP 2,0%	LODO CAP 3,0%	VMP⁽¹⁾	UNIDADE
Nitrato em N	<0,05	0,65	1,37	0,94	2,4	10	mg/L
pH	8,4	7,6	7,3	7,6	7,4	-	-
Potássio Total	142,75	3,2	3,4	3,4	4	-	mg/L
Prata Total	<0,00050	<0,00050	<0,00050	<0,00050	<0,00050	0,05	mg/L
Salinidade	10,5525	0,037	0,1	0,07	0,13	-	‰
Sódio Total	1688,25	3,3	13,9	13,9	18,6	200	mg/L
Vanádio Total	<0,00100	<0,00100	<0,00100	<0,00100	<0,00100	-	mg/L
Zinco Total	0,0275	0,0071	0,0119	0,0051	0,0236	5	mg/L

(1) VMP: Valor máximo permitido segundo a ABNT NBR 10004/2004.

Não foi detectada acidez ou alcalinidade excessivas nas análises dos extratos solubilizados dos corpos de prova asfálticos, tendo em vista que as amostras em contato com o CAP apresentam pH próximos a neutro, e o lodo têxtil básico. Tal aspecto demonstra a apreensão dos elementos que atribuem caráter básico ao lodo têxtil, especialmente o magnésio.

Em relação à matéria orgânica e ao molibdênio total, foi possível verificar o aprisionamento de 100% em todas as formas de inserção avaliadas. Juntamente a estes primeiros, a calcita, o magnésio, sódio e o potássio foram os elementos que apresentaram menor solubilização em números totais. O aprisionamento desses elementos por parte da matriz asfáltica foi superior a 99%.



Para a alcalinidade em CaCO_3 , foi observada uma redução acima de 98% em todas as amostras. No que se trata do cálcio total, foi maior que 90% o percentual de imobilização, atingindo até 94%. Ao avaliar o antimônio e bário, nota-se que 95% destes ficaram aprisionados na matriz asfáltica. Em relação à salinidade, é percebida uma redução de mais de 99%.

No extrato do lodo têxtil puro, a concentração de sódio total está acima dos limites estabelecidos pela NBR 10004/2004, porém, ao ser inserido na matriz asfáltica, notou-se aprisionamento satisfatório, com a diminuição de, aproximadamente, 120 vezes sua concentração, se situando consideravelmente abaixo dos limites normativos.

Os valores relacionados ao “nitrato em N” e “cádmio total” não possuem relação com o lodo têxtil, já que não foram detectados nas análises das amostras puras. De forma semelhante, o chumbo, o níquel, a prata, o fosfato e o vanádio não se encontravam presentes em quantidades mensuráveis tanto no lodo têxtil, quanto nas amostras de mistura asfáltica. Em virtude das reduzidas concentrações de zinco, não foi possível realizar uma análise quantitativa.

Quanto às diferentes formas de inserção, há uma tendência de aprisionamento superior para o cobre e o cobalto na inserção úmida, sendo o lodo misturado ao ligante. Desse modo, pode-se inferir que os componentes do lodo têxtil possuem maior afinidade ao ligante asfáltico do que a água.

Por fim, o aprisionamento eficiente dos resíduos nas matrizes asfálticas é consoante com o verificado por Modarres *et al.* (2015) em estudos com cinza e pó de carvão, nos quais foram analisados os teores de cádmio, cromo, chumbo, níquel, mercúrio, arsênio, cobre e zinco.

Moura (2021) avaliou a viabilidade operacional da incorporação do lodo têxtil nas misturas asfálticas, considerando o cenário do APL (Arranjo Produtivo Local) de Confecções do Agreste. Foi observado que o custo para processar o lodo têxtil, secagem e destorroamento, é inferior ao de encaminhá-lo para disposição final em aterro apropriado. Além disso, considerando o volume de revestimento asfáltico aplicado no município de Caruaru-PE, por ano, verificou-se que poderiam ser destinados cerca de 300 a 458 toneladas de lodo têxtil. Vale destacar que, existem mais de 800 lavanderias industriais no Agreste pernambucano e, apenas uma lavanderia de médio porte, que processa cerca de 100 mil peças de vestuário por ano, gera cerca de 6 toneladas de lodo têxtil seco anualmente. Considerando o custo do filer convencional utilizado, a cal, o valor investido em maquinário pra utilização do resíduo seria retornado em aproximadamente um ano.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, observa-se que as misturas asfálticas analisadas foram eficientes na estabilização e solidificação dos componentes presentes no lodo têxtil, nas proporções e dosagens estudadas. Assim, o ensaio de solubilização se configura como uma ferramenta de avaliação ambiental de materiais alternativos que contém algum tipo de resíduo. É de suma importância garantir a imobilização dos materiais residuais inseridos como constituinte de materiais de construção, evitando danos ambientais diversos em decorrência do desprendimento do resíduo na matriz onde foi inserido pela ação da água. Não foi identificado prejuízo no aspecto ambiental quando comparadas as misturas contendo lodo têxtil em relação com misturas convencionais. Em



DOI: [10.29327/1430212.49-55](https://doi.org/10.29327/1430212.49-55)

IMPACTOS AMBIENTAIS DA UTILIZAÇÃO LODO TÊXTIL EM CONCRETO ASFÁLTICO AO SER EXPOSTO A ÁGUA

relação às formas de inserção, nota-se um desempenho ligeiramente superior na forma úmida, entretanto ambas são consideradas satisfatórias.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa de iniciação científica BIC-1184-3.01/20 e à coordenação e aos técnicos do Laboratório de Química (LQ) do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco pelo auxílio na realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

AL-HDABI, A. Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 544-551, 2016.

ANWAR, T. B. *et al.* Utilization of textile sludge and public health risk assessment in Bangladesh. **Sustainable Environment Research**, p. 1-6, 2018.

AQUINO, R. C. Adição de resíduo de lodo da indústria têxtil na produção de blocos cerâmicos de vedação. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 10, n. 1, p. 29-35, 2015.

BARRA, B. *et al.* Characterization of granite and limestone powders for use as fillers in bituminous mastics dosage. In: **Academia Brasileira de Ciências**. Anais [...]. Rio de Janeiro, v. 86, p. 995-1002, 2014.

CHOI, M. J. *et al.* Performance evaluation of the use of tire-derived fuel fly ash as mineral filler in hot mix asphalt concrete. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, 2019.

COMETTI, J. *et al.* Diagnóstico ambiental comparativo entre 2014 e 2015 das indústrias têxteis do município de Toritama-PE. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL**, VII, 2016. Anais [...]. Campina Grande/PB, 2016.

EAPA. **Manifesto of the European Asphalt Pavement Association on the occasion of its 50th Anniversary 1973-2023** (2023) Disponível em: < <https://asefma.es/wp-content/uploads/2023/06/2023-manifesto-of-eapa-on-the-occasion-of-it-50th-anniversary-2.pdf>>. Acessado em 19 de abril de 2023.

FERREIRA, M. N. **Incorporação de lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE) de lavanderia industrial em cerâmica vermelha**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.

GOYAL, S. *et al.* Utilization of textile sludge in cement mortar and paste. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 169-177, 2019.

HEREK, L. C. S. Characterization of ceramic bricks incorporated with textile laundry sludge. **Ceramics International**, v. 38, p. 951-959, 2012.

HOSSAIN, M. S. *et al.* Reuse of Textile Mill ETP Sludge in Environmental Friendly Bricks – Effect of Gamma Radiation. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 151, p. 77-83, 2018.

JAMSHIDI, A. *et al.* Comparative study on engineering properties and energy efficiency of asphalt mixes incorporating fly ash and cement. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 295-304, 2018.



JITSANIGAM, P. *et al.* Sustainable utilization of lime kiln dust as active filler in hot mix asphalt with moisture damage resistance. **Sustainable Materials and Technologies**, 2018.

MODARRES, A. *et al.* Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 91, p. 262-268, 2015.

MOURA, L. S. **Utilização de lodo de tratamento têxtil em revestimentos asfálticos: uma análise mecânica, microscópica e ambiental**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, CTG-UFPE/PE, Recife.

PASANDÍN, A. M. R. *et al.* Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with paper industry wastes as filler. **Journal of Cleaner Production**, 2015.

PUTRA JAYA, R. *et al.* Marshall stability properties of asphalt mixture incorporating black rice husk ash. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, p. 22056-22062, 2018.

SOUTO, T. J. M. P. **Estudo do comportamento químico e ambiental de efluentes industriais e resíduos sólidos oriundos de lavanderias do polo têxtil no Agreste pernambucano**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE.

VELUMANI, P. *et al.* An Innovative Approach to Evaluate the Performance of Sludge-Incorporated Fly Ash Bricks. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 44, 2016.

WOSZUK, A. *et al.* Fly ash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 493-502, 2019.

ZANONI, S. M. **Reutilização de resíduos de indústria têxtil como matéria-prima em cerâmica vermelha**. 2013. Monografia (Trabalho de Conclusão de Estágio) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma/SC.

ZHAN, B. *et al.* Recycling hazardous textile effluent sludge in cement-based construction materials: Physicochemical interactions between sludge and cement. **Journal of Hazardous Materials**, 2019.

ZHAN, B.; POON, C. S. Study on feasibility of reutilizing textile effluent sludge for producing concrete blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 101, p. 174-179, 2015.



REVISÃO ANALÍTICA SOBRE O POTENCIAL USO DO DIÓXIDO DE TITÂNIO NA PAVIMENTAÇÃO

Maria Ingridy Lacerda Diniz¹; Chrysttvan Thalles Ribeiro Felix¹; Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena¹; Talita Miranda de Sousa¹ & Osires de Medeiros Melo Neto¹

RESUMO

A contínua pesquisa de novas aplicações de materiais na área da pavimentação é de suma importância para o avanço da engenharia civil e o desenvolvimento de infraestruturas viárias mais eficientes e sustentáveis. Este artigo fornece uma revisão abrangente da aplicação do dióxido de titânio para múltiplas finalidades na pavimentação, como a avaliação de sua capacidade fotocatalítica com suas respectivas as implicações ambientais, além de aplicação como agente modificador de ligantes asfálticos. Com base nos estudos revisados, observou-se um potencial significativo no estudo da qualidade do ar urbano, além do potencial de prolongar a vida útil das infraestruturas viárias a partir de sua utilização como agente modificador de ligantes asfálticos, apresentando resultados positivos quanto a susceptibilidade à deformação permanente, a resistência ao dano por fadiga, a capacidade de resistência ao envelhecimento oxidativo, a viscosidade aparente, e as variações no módulo de cisalhamento dinâmico e no ângulo de fase. No entanto, observou-se a necessidade de novas pesquisas para elucidar completamente seus efeitos a longo prazo a exposição ao meio ambiente, a viabilidade econômica de sua aplicação além de estudos sobre o comportamento mecânico de sua incorporação em misturas asfálticas. Também foi observada a ausência de estudos na literatura que abordem a análise do ciclo de vida de pavimentos modificados com TiO₂, o que proporciona diversas lacunas a serem preenchidas por pesquisadores da área.

PALAVRAS-CHAVE: Efeito Fotocatalítico; Ligantes Asfálticos; Agente Modificador.

ABSTRACT

Continuous research into new material applications in the area of paving is extremely important for the advancement of civil engineering and the development of more efficient and sustainable road infrastructures. This article provides a comprehensive review of the application of titanium dioxide for multiple purposes in paving, such as the evaluation of its photocatalytic capacity with its respective environmental implications, in addition to its application as a modifying agent for asphalt binders. Based on the studies reviewed, a significant potential was observed in the study of urban air quality, in addition to the potential to extend the useful life of road infrastructures through its use as a modifying agent for asphalt binders, presenting positive results regarding susceptibility to permanent deformation, resistance to fatigue damage, resistance to oxidative aging, apparent viscosity, and variations in dynamic shear modulus and phase angle. However, there was a need for further research to fully elucidate its effects on long-term exposure to the environment, the economic viability of its application in addition to studies on the mechanical behavior of its incorporation into asphalt mixtures. It was also observed the absence of studies in the literature that address the analysis of the life cycle of pavements modified with TiO₂, which provides several gaps to be filled by researchers in the area.

KEY WORDS: Photocatalytic Effect; Asphalt binders; Modifying Agent.

¹ Universidade Federal de Campina Grande, e-mail: mariaingridvdiniz@gmail.com; thalles.chrysttvan@gmail.com; adriano.elisio@professor.ufcg.edu.br; talita.miranda@hotmail.com; osiresdemedeiros@gmail.com.



INTRODUÇÃO

Os pavimentos estão presentes no cotidiano das pessoas. Com isso, é importante compreender que o pavimento é uma composição de ligantes e agregados, o qual tem como sua composição algumas camadas: base, sub-base, reforço do subleito e camada de revestimento asfáltico (Silva *et al.*, 2018). Concomitante a isso, pode-se compreender também que o pavimento é uma estrutura na qual é composta por camadas posicionadas por cima do solo com o objetivo de resistir a cargas, intempéries, além de fornecer segurança e conforto para o usuário (Duarte e Peixoto, 2023).

Ademais, sabe-se que existem tipologias diferentes de pavimentos. No Brasil encontra-se comumente dois tipos, sendo os rígidos e flexíveis, contudo o país regularmente projeta e utiliza do segundo tipo outrora abordado (CNT, 2017). Desta forma, é importante compreender as diferentes tipologias de pavimentos utilizadas, sendo: o pavimento flexível pode ser compreendido como o tipo de pavimento no qual todas as camadas (sub-base, base, reforço do subleito e revestimento asfáltico) sofrem deformação e ação das cargas exercidas no pavimento; No que tange o pavimento rígido, é o pavimento no qual a camada de revestimento é rígida e absorve maior parte dos esforços em relação às demais camadas (Duarte e Peixoto, 2023).

Duarte e Peixoto (2023) afirma que existe uma terceira tipologia de pavimento no Brasil, sendo o semi-rígido (intermediário entre o flexível e o rígido), contudo o menos utilizado no país.

Com o uso diário e a exposição do pavimento asfáltico a intempéries, é comum o surgimento de patologias na estrutura, como fendas, afundamentos, desgastes, e podem ser ocasionadas não apenas por intempéries, mas como também por falha de projeto, demora de manutenção (Oliveira *et al.*, 2019), ou baixo desempenho das propriedades mecânicas.

Para tanto, compreende que o pavimento tem o intuito de fornecer condições ideais para trafegabilidade (Oliveira *et al.*, 2019). Dentro desse contexto, a procura por melhoria da qualidade dos pavimentos, trouxe consigo o estudo das misturas asfálticas modificadas com um outros diferentes materiais. Sendo assim, este artigo tem como o material modificante da mistura asfáltica o Dióxido de Titânio (TiO_2), o qual já é um material utilizado no setor da construção civil, como também em diversas outras áreas do mercado.

Desta forma, observa-se que o TiO_2 é utilizado dentro da construção civil na produção de argamassas devido sua capacidade de degradar os poluentes atmosféricos do meio urbano (Aguiar, 2018). Simultaneamente a isso, pode-se enfatizar que o TiO_2 pode ser aplicado também, em solos. Dentro desse contexto é importante salientar que TiO_2 vem a aparecer na natureza em diferentes formas, dentre elas as três formas cristalinas conhecidas: Anatase tetragonal, broquita ortorrômbica e rutilo tetragonal (Soares, 2018).

O dióxido de titânio tem recebido crescente atenção devido às suas propriedades fotocatalíticas e capacidade de descontaminação além de seu potencial como agente modificador de ligante asfálticos. Sua aplicação na pavimentação pode contribuir para a redução da poluição do ar, a autolimpeza de superfícies e a melhoria da durabilidade das estruturas viárias. Nesta revisão, examinou-se criticamente estudos que exploram a aplicação do dióxido de titânio em materiais de pavimentação, suas propriedades e impactos.

DIÓXIDO DE TITÂNIO

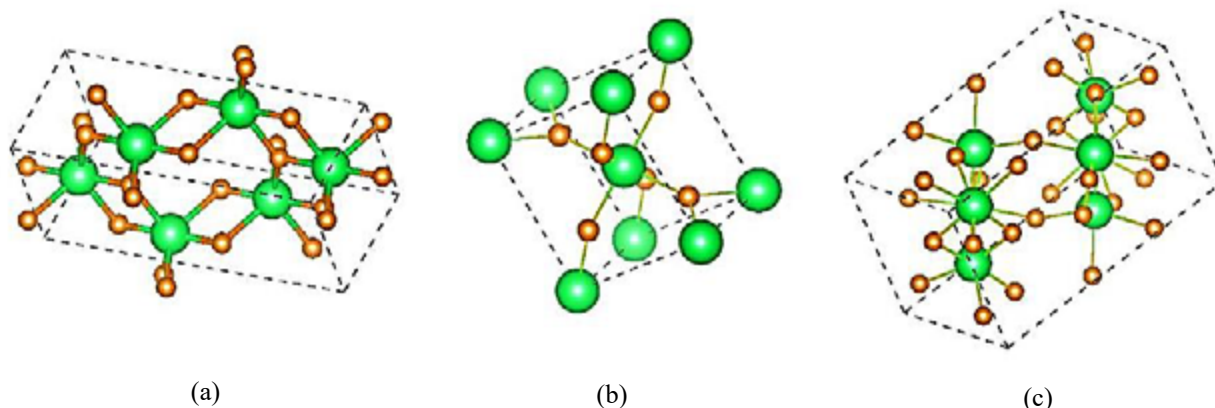
O dióxido de titânio ocorre naturalmente em três formas polimórficas: anatase (tetragonal), rutilo (tetragonal) e bronquita (ortorrômbica), como ilustrado na figura 1. Globalmente, a extração de TiO_2 está principalmente concentrada na ilmenita, um mineral de titânio amplamente disponível. Outras



DOI: 10.29327/1430212.49-23

REVISÃO ANALÍTICA SOBRE O POTENCIAL USO DO DIÓXIDO DE TITÂNIO NA PAVIMENTAÇÃO

fontes de extração incluem o rutilo, que contém uma quantidade significativa do elemento, embora seja menos comum em comparação com a ilmenita (Queiroz Filho; Amorim Neto, 2014).



(a)

(b)

(c)

Figura 1. Estruturas cristalinas do dióxido de titânio: (a) Anatase, (b) Rutilo e (c) Broquita. (Vitoret *et al.*, 2017)

Devido à sua capacidade de absorver oxigênio na forma de íons após fotoexcitação, a fase anatase (figura 1 - a) é considerada a mais fotoativa de todas as fases, e é amplamente estudada e utilizada em processos fotocatalíticos. Mas sua aplicação é restrita aos procedimentos induzidos pela energia solar, pois a radiação incidente na Terra representa 52% da radiação infravermelha, 43% da faixa visível e 5% da radiação ultravioleta (Kumar; Devi, 2011).

O rutilo é reconhecido como a fase mais estável dos polimorfos apresentados na figura 1 - b, conforme Shon *et al.* (2011). Seus cristais são formados por vários métodos de síntese, incluindo via úmida e podem composição química de vapor; também podem ser formados pela conversão das outras fases, anatase e broquita, a temperaturas superiores a 800 °C.

Já a fase broquita (figura 1 - c) é extremamente difícil de sintetizar em sua forma separada. Devido à sua instabilidade termodinâmica, ela é normalmente encontrada como um subproduto, juntamente com as demais fases (Ranade *et al.*, 2002). Por outro lado, durante essa fase, a visibilidade para aplicações fotocatalíticas foi demonstrada por seu espaçamento de banda, forma e outras características ópticas (Kandiel *et al.*, 2010; Machado, 2016).

EFEITO FOTOCATALÍTICO DO DIÓXIDO DE TITÂNIO

Substâncias com a capacidade fotocatalítica são capazes de depurar impurezas contidas no ar atmosférico. Sendo assim, Rocha Segundo (2018) afirma que, quando alguns materiais semicondutores “na presença de água (umidade) e de oxigênio são irradiados pela luz ultravioleta (UV) emitida pelo sol, são gerados radicais livres muito reativos que têm a capacidade de degradar poluentes orgânicos transformando-os em CO₂ e água”.

Concomitante a isso, Carneiro *et al.* (2013) afirma que:

“O processo de fotocatalise inicia-se pela absorção de um fóton com energia igual ou superior ao hiato de energia do semicondutor, gerando-se pares elétron/lacuna (e⁻/h⁺). Uma fração dos pares (e⁻/h⁺) migram para a superfície do semicondutor e participam em reações químicas de oxidação-redução, gerando-se radicais altamente reativos”.

Ou seja, com a presença de oxigênio e água (a qual é oriunda da umidade relativa do ar), fazendo com que os radicais reajam com os poluentes adsorvidos na superfície do semicondutor vindo a ser decompostos. Sendo assim, de forma geral, o princípio da fotocatalise heterogênea vem a envolver a ativação do semicondutor seja por luz solar ou seja por luz artificial.



Batista (2020) enfatiza que pavimentos com materiais de capacidade fotocatalítica possuem a capacidade de depuração do ar. Ou seja, pavimentos com a presença desses materiais ajudam na degradação dos poluentes do ar, o que traz uma vantagem bem interessante tendo em vista a quantidade de gases emitidos pelos veículos.

Rocha Segundo (2018) afirma que o dióxido de titânio (TiO_2) é considerado o principal semiconductor para a promoção da capacidade fotocatalítica, além de apresentar baixa toxicidade, alta estabilidade e facilidade de se encontrar no mercado e na natureza. Em consonância a informação anterior, Oliveira (2018) afirma que o TiO_2 em sua fase de anatase possui sua maior capacidade fotocatalítica devido sua energia ser “band-gap” maior.

Com isso, Silva (2019) afirma que a atividade fotocatalítica do TiO_2 é ativada a partir da irradiação da luz solar ou até luz artificial UV. Por meio desse mecanismo, se existe uma ativação do elétron-buraco que irá para a superfície do catalisador reagindo com os compostos presentes nessa superfície.

Garrote *et al.* (2022) concluiu em seu estudo que a adição do TiO_2 em pavimentos, em relação a fotodegradação, teve um impacto significativo com a incorporação de 4% em mistura asfáltica, chegando a atingir 25% de fotodegradação de compostos orgânicos em 6 horas. Ainda nesse contexto, observou que com a incorporação de 6% de TiO_2 também possuiu uma fotodegradação satisfatória, provando a eficiência da adição do Dióxido de Titânio à mistura.

Borazanian *et al.* (2019), por sua vez, em seu estudo observou que a incorporação do TiO_2 foi capaz de degradar a maior parte das impurezas presentes na superfície. Além disso, ele concluiu que a incorporação do TiO_2 com a função de promover uma limpeza tende a ser promissora dentro da construção civil, em diversas áreas para além de pavimentos.

Cadorin *et al.* (2020) incorporou 15% de TiO_2 em peso do ligante 50/70 e concluiu que a sua atividade fotocatalítica na depuração do ar foi considerada satisfatória. Além disso, observou também que essa incorporação não atinge negativamente a reologia do ligante, proporcionando um leve aumento do desempenho em relação a alguns parâmetros de referência.

APLICAÇÃO DE TiO_2 EM LIGANTES ASFÁLTICOS

O uso de aditivos para melhorar as propriedades dos ligantes asfálticos tem sido uma área de pesquisa ativa na engenharia de pavimentos. Entre esses aditivos, o dióxido de titânio tem recebido crescente atenção devido às suas propriedades para aprimorar a durabilidade e o desempenho dos pavimentos. Alguns estudos já avaliaram o uso do TiO_2 como agente modificador de ligantes asfálticos, destacando suas características, métodos de aplicação e impacto nas propriedades dos materiais asfálticos.

Badin *et al.* (2021) conduziram uma pesquisa sobre o impacto da incorporação de pigmentos de dióxido de titânio (bem como de óxido de ferro) nas características térmicas e reológicas do asfalto. A concentração dos pigmentos foi mantida em 4% em peso da mistura total para todos os óxidos. Os resultados revelaram que as misturas asfálticas pigmentadas permaneceram de 4 a 5°C mais frias em comparação com as amostras não modificadas. A análise reológica indicou um aumento na rigidez do aglutinante pigmentado, sugerindo um melhor desempenho em temperaturas mais elevadas.

Já na investigação conduzida por Cadorin *et al.* (2021), foram realizados experimentos com o propósito de examinar a eficácia fotocatalítica e o impacto na reologia através da produção de ligantes asfálticos com diferentes proporções de incorporação de nano- TiO_2 (3%, 6%, 9%, 12% e 15%). Os pesquisadores conduziram testes experimentais para avaliar aspectos como a susceptibilidade à deformação permanente, a resistência ao dano por fadiga, a capacidade de resistência ao



DOI: [10.29327/1430212.49-23](https://doi.org/10.29327/1430212.49-23)

REVISÃO ANALÍTICA SOBRE O POTENCIAL USO DO DIÓXIDO DE TITÂNIO NA PAVIMENTAÇÃO

envelhecimento oxidativo, a viscosidade aparente, e as variações no módulo de cisalhamento dinâmico e no ângulo de fase.

Os resultados obtidos revelaram um aumento na viscosidade do ligante conforme a quantidade de titânio aumentava. Por exemplo, em comparação com o ligante asfáltico convencional, o ligante contendo 15% de TiO_2 demonstrou um incremento na viscosidade de 41,8%, 42,3% e 40,2% em temperaturas de 135° C, 150° C e 177° C, respectivamente. Esse efeito é atribuído à reduzida mobilidade das cadeias moleculares ligantes e ao reforço proporcionado pelo TiO_2 na nanoestrutura da matriz (Cadorin *et al.*, 2021).

Marinho Filho *et al.* (2020) investigaram os efeitos reológicos resultantes da inclusão de nanopartículas de TiO_2 no ligante 55/75-E, em proporções de 3%, 4% e 5% em massa do ligante. Os resultados do estudo indicaram que conforme aumentava a quantidade de TiO_2 no ligante, houve um aumento na temperatura de amolecimento, uma redução na penetração e uma diminuição no parâmetro Jnr para ambas as intensidades testadas, sugerindo que os ligantes modificados eram menos suscetíveis a deformações permanentes. Além disso, em relação à viscosidade, os ligantes modificados apresentaram um parâmetro maior do que o ligante puro antes do processo de envelhecimento RTFOT. No entanto, após o envelhecimento, os ligantes modificados exibiram um comportamento inverso, com viscosidades mais baixas do que o ligante puro.

Assim, os pesquisadores concluíram que a adição de TiO_2 resultou em uma redução na complacência não recuperável, indicando um aumento na resistência à deformação permanente. Os ligantes modificados também demonstraram um retardamento no processo de envelhecimento, como evidenciado pelo índice de envelhecimento e pela redução na perda de massa (Marinho Filho *et al.*, 2020).

Zhang *et al.* (2021) investigaram diversas propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com uma nanopartícula $TiO_2/CaCO_3$, preparada na proporção de 20% de TiO_2 e 80% de $CaCO_3$, e incorporada em diferentes proporções de 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8% e 9% em peso do ligante. Os resultados do estudo indicaram que a adição de nano- $TiO_2/CaCO_3$ melhorou a capacidade de resistência ao sulco do asfalto, assim como a resistência à fadiga em temperaturas médias. Constatou-se que, à medida que a dosagem de nano- $TiO_2/CaCO_3$ aumentava, houve uma diminuição na penetração e na ductilidade dos ligantes modificados, enquanto o ponto de amolecimento aumentava. Além disso, observou-se que a inclusão de nano- $TiO_2/CaCO_3$ pode enfraquecer a resistência à fissuração em baixas temperaturas do betume.

Os autores notaram que, para os ligantes com incorporação de proporções superiores a 5% de nano- $TiO_2/CaCO_3$, as taxas de melhoria nos resultados dos testes foram reduzidas, sugerindo que, embora o aumento na quantidade de nanopartículas ainda resultasse em melhorias nas características avaliadas, essa melhoria se tornava progressivamente menos significativa. Portanto, os autores recomendaram uma proporção ótima de incorporação do material de 5% (Zhang *et al.*, 2021).

Enieb *et al.* (2023) investigaram o efeito de diferentes proporções de nano- TiO_2 (1,5%, 3,5%, 5,5% e 9%) adicionadas a ligantes asfálticos, visando avaliar a reologia dos materiais e a resistência ao sulco das amostras por meio do uso de um dispositivo Hamburg Wheel Track (HWTD). Os resultados da pesquisa indicaram melhorias nas propriedades reológicas dos ligantes asfálticos modificados, tanto envelhecidos quanto não envelhecidos, com a incorporação de nano- TiO_2 , além de sugerirem um aumento na resistência ao sulco das misturas asfálticas. Essas conclusões foram corroboradas por uma análise estatística realizada pelos autores. No entanto, a rigidez e a diferença de Jnr não demonstraram uma influência significativa com a adição do material ao ligante.



APLICAÇÕES DE TiO₂ EM OUTROS SETORES DA INDÚSTRIA

O TiO₂, assim como outros diversos materiais, possui diversas aplicações dentro das mais variadas áreas da indústria devido suas propriedades e características. Dito isto, dentro da construção civil o TiO₂ foi aplicado na produção de argamassas, no qual Aguiar (2018), afirma que foram materiais que por décadas não vieram a receber modificações substanciais. Dentro desse contexto, o autor supracitado observou que o TiO₂ tem propriedades fotocatalíticas capazes de reagir com poluentes do meio urbano. Sendo assim, o autor concluiu que a combinação do dióxido de titânio com o PCM micro surge a possibilidade de produção de argamassas com capacidade de auto limpeza e armazenamento de calor.

Bergamasco *et al.* (2019), adicionou TiO₂ em uma membrana comercial utilizada para tratamento de águas, e obteve como resultado da pesquisa o melhoramento significativo no desempenho fotocatalítico através da adição.

Além disso, pode-se enfatizar a aplicação do TiO₂ dentro da indústria farmacêutica. Dentro deste contexto, foi observado que existe um grande consumo de fármacos no mundo, e que concomitante a esse consumo têm-se a geração de resíduos que acabam poluindo o meio ambiente através do descarte irregular. Desta forma, Moreira (2019) fez a avaliação da utilização de semicondutores de TiO₂ na degradação da Sertralina através do processo de fotocatalise. Logo é válido ressaltar que, se mostrou um estudo com uma grande eficiência, possuindo uma taxa de remoção de 74% a 83%.

No setor da medicina, Maddah *et al.* (2023) concluiu que o TiO₂ veio a fazer uma redução no tempo de sobrevivência das células além de terem induzido danos na célula do câncer HC7116. Concomitante a isso, o TiO₂ veio a reduzir as atividades de algumas enzimas antioxidantes (catalase, superóxido dismutase e glutathiona peroxidase) e reduziu a capacidade antioxidante total.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos revisados demonstraram consistentemente os benefícios da incorporação de TiO₂ na melhoria das propriedades mecânicas e da durabilidade dos ligantes asfálticos, resultando em pavimentos mais resilientes e de longa vida útil. Além disso, o TiO₂ tem mostrado capacidade de fotodegradação de poluentes atmosféricos, contribuindo para a redução da poluição do ar e a autolimpeza das superfícies pavimentadas, tornando-se uma solução promissora para a sustentabilidade ambiental das infraestruturas viárias.

No entanto, apesar dos avanços significativos alcançados até o momento, ainda há desafios a serem superados antes da adoção generalizada do TiO₂ na pavimentação. Questões como a otimização das formulações, a padronização dos processos de fabricação e a avaliação da viabilidade econômica em larga escala permanecem como áreas de pesquisa crítica. Além disso, são necessários estudos adicionais para investigar os efeitos a longo prazo da exposição ambiental e do tráfego nas propriedades e no desempenho dos materiais de pavimentação contendo TiO₂, a fim de garantir sua eficácia e sustentabilidade a longo prazo.

Por fim, destaca-se a importância da colaboração entre pesquisadores, profissionais da indústria e responsáveis pelo desenvolvimento de novas tecnologias na pavimentação, visando impulsionar o progresso do conhecimento e da aplicação do TiO₂ na pavimentação. Desta forma, será possível explorar todo o potencial do material contribuindo assim para a criação de um ambiente urbano mais saudável e sustentável para as próximas gerações.

DOI: [10.29327/1430212.49-23](https://doi.org/10.29327/1430212.49-23)

REVISÃO ANALÍTICA SOBRE O POTENCIAL USO DO DIÓXIDO DE TITÂNIO NA PAVIMENTAÇÃO

REFERÊNCIAS

- BADIN, G.; AHMAD, N.; ALI, H.M.; AHMAD, T.E.; JAMEEL, M.S. Effect of addition of pigments on thermal characteristics and the resulting performance enhancement of asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 302, p. 124212, 2021. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2021.124212](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124212)
- BATISTA, P.H.P. Estudo comparativo da viabilidade de implementação de pavimentos fotocatalíticos em diferentes cias da cidade do Rio de Janeiro. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- BERGAMASCO, R.; COLDEBELLA, P.F.; CAMACHO, F.P. et al. Self-assembly modification of polyamide membrane by coating titanium dioxide nanoparticles for water treatment applications. **Rev. Ambient. Água** 14 (3), 2019. DOI: [10.4136/ambi-agua.2297](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2297)
- BORAZANIAN, T.C.F.; SZURKALO, M.; CORREIA, O.V.; BENTO, R.T.; PILLIS, M.F. Revestimentos de TiO₂ para a preservação de superfícies arquitetônicas. **59º Congresso Brasileiro de Química**. 2019.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE, CNT. BRASIL TEM MÉTODO ANTIGO PARA DIMENSIONAR PAVIMENTOS. 2017. Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/brasil-tem-metodo-antigo-para-dimensionar-o-pavimento>>. Acesso em: 27 de maio de 2024.
- CADORIN, N.D.A.; MELO, J.V.S.; BROERING, W.B.; et al. Asphalt nanocomposite with titanium dioxide: Mechanical, rheological and photoactivity performance. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123178, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123178>
- CARNEIRO, J.O.; FREITAS, E.; TEIXEIRA, V.; FERNANDES, F. et al. Utilização de nanopartículas de TiO₂ para o desenvolvimento de pavimentos rodoviários com capacidade fotocatalítica. Conference: 7º Congresso Rodoviário PortuguêsAt: Lisboa, Portugal, 2013. DOI: <https://hdl.handle.net/1822/26160>
- DUARTE, Kethelyn da Silva.; PEIXOTO, Murilo Santos. Pavimento rígido concreto: Uma solução sustentável e eficiente para infraestruturas viárias. **Revista JF**, v. 27, 2023. DOI: [10.5281/zenodo.10392799](https://doi.org/10.5281/zenodo.10392799)
- ENIEB, M.; CENGIZHAN, A.; KARAHANCER, S. et al. Avaliação das propriedades físico-reológicas do ligante asfáltico modificado com dióxido de nanotitânio e da resistência ao sulco da mistura modificada. **Internacional J. Pavimento Res. Tecnologia**. 16, 285–303, 2023. DOI: <https://doi-org.ez15.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s42947-021-00131-0>
- GARROTE, B.J.; SILVA, G.S.M.; POLIZEL, G. Utilização De Dióxido De Titânio Para A Produção De Pavimento Fotocatalítico. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2022.
- KANDIEL, T. A.; FELDHOFF, A.; ROBBEN, L.; DILLERT, R.; BAHNEMANN, D. W. Tailored Titanium Dioxide Nanomaterials: Anatase Nanoparticles and Brookite Nanorods as Highly Active Photocatalysts. **Chemistry of Materials**, v. 22, n. 6, p. 2050–2060, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/cm903472p>
- KUMAR, S. G.; DEVI, L. G. A review on modified TiO₂ photocatalysis under VU/visible light: selected results and related mechanisms on interfacial charge carrier transfer dynamics. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 115 (46), p. 1311-13241, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp204364a>
- MACHADO, W. A. Caracterização e avaliação da atividade fotocatalítica de catalisadores baseados no TiO₂, sintetizados mediante hidrólise em uma mistura de solventes. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- MADDAH, A.; DANESH, H.; GHASEMI, P. et al. The Effect of Titanium Dioxide (TiO₂) Nanoparticles on Oxidative Stress Status in the HCT116 Human Colon Cancer Cell Line. **BioNanoScience**, 13(2):1-9, 2023. DOI: [10.1007/s12668-023-01103-3](https://doi.org/10.1007/s12668-023-01103-3)
- MARINHO FILHO PGT; SANTOS ATR; LUCENA LC; TENÓRIO EAG. Rheological Evaluation of Asphalt Binder Modified with Nanoparticles of Titanium Dioxide. **Int J Civ Eng**. 18(10):1195–207. 2020. DOI [https://doi.org/10.1007/s40999-020-00525-4\(0](https://doi.org/10.1007/s40999-020-00525-4(0)
- MOREIRA, A.J.; MALDI, C.P; FRESCHI, G.P.G. Aplicação de processo fotocatalítico mediado por dióxido de titânio para degradação de Sertralina. *Acta Brasiliensis*, 3(1):17, 2019. DOI: [10.22571/2526-4338117](https://doi.org/10.22571/2526-4338117)



OLIVEIRA, D.C.; BIFANO, R.P.; SOUZA, R.E.; OLIVEIRA, R.A.E.; TOLEDO, C. E. Identificação De Manifestações Patológicas Em Pavimentos Asfálticos Na Cidade De Santa Margarida - Mg. **Revista Pensar Acadêmico**, v. 17 n. 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21576/pa.2019v17i1.703>

OLIVERIA, G.L. Síntese de TiO₂ com diferentes características físicas e químicas e sua aplicação como fotocatalisador no tratamento de efluentes. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear). Universidade de São Paulo - São Paulo. 2018.

QUEIROZ FILHO A.A.; AMORIM NETO A.A. Titânio. In: Lima T.M. & Neves C.A. Sumário Mineral 2015. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), v. 35, p. 110-111. ISSN: 01012053.

RANADE, M. R.; NAVROTSKY, A.; ZHANG, H. Z.; et al. Energetics of nanocrystalline TiO₂. **Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America**, v. 99, p. 6476-6481, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.25153489>

ROCHA SEGUNDO, Iran Gomes da. Avaliação das Capacidades Fotocatalítica, Superhidrofóbica e Autolimpante de Misturas Betuminosas Funcionalizadas com TiO₂ e ZnO. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil). Universidade do Minho - Rio de Janeiro. 2018.

SOARES, L.R.R. Avaliação de misturas asfálticas modificadas com nanopartículas de dióxido de titânio modificadas superficialmente. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

SHON H.K.; EL SALIBY I.; ERDEI L.E.; KIM, J.H. Development of visible light sensitive titaniaphotocatalysts by combined nitrogen and silver doping. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v.7, p. 358, 2011. DOI:10.1016/j.jiec.2011.02.039

SILVA, F.M.D.; ANHOLETII, M.; AMORIM JUNIOR, J.C. Estudo Dos Afundamentos Nos Pavimentos Asfálticos. Projeto de Pesquisa. Faculdade Multivix, 2018. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2018/06/estudo-dos-afundamentos-nos-pavimentos-asfalticos.pdf>. Acesso em: 08 de abril de 2024.

SILVA, J.R. Análise da eficiência fotocatalítica de filmes de TiO₂ depositadas em cerâmicas de revestimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil Empresarial). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

VITORETI A.B.; VAZ, R.; PENA, A.L.; et al. Titanium dioxide application in solar cells. **Rev Virtual Quim**, 9(4):1481–510, 2017. DOI:10.21577/1984-6835.20170086

ZHANG L, GAO X, WANG W, WANG H, ZHENG K. Laboratory Evaluation of Rheological Properties of Asphalt Binder Modified by Nano-TiO₂/CaCO₃. Guo S, organizador. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2021:1–13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/5522025>

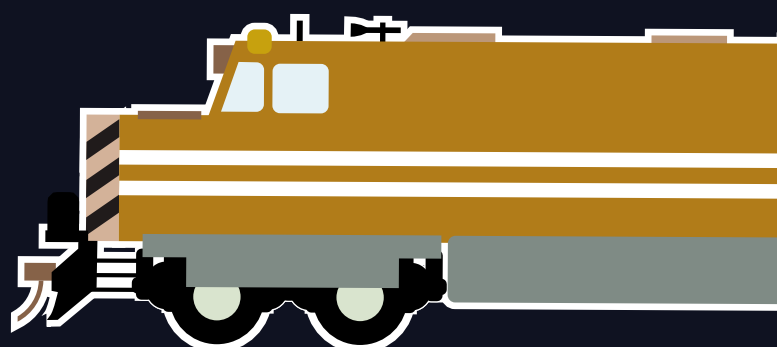


26° Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br



ABDER



**RECICLAGEM
DE PAVIMENTOS**

PROGRAMAÇÃO
TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS E ESTUDOS DE CASOS DE OBRAS
Quarta-feira, 21 de agosto

SALA ABAIS		
RECICLAGEM DE PAVIMENTOS (ST05)		
⌚ 09:20	TT142	AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS COM A INCORPORAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS FRESADOS
⌚ 09:40	EC848	APLICAÇÃO DE MATERIAL ESTABILIZADO COM EMULSÃO ASFÁLTICA (BSM) PARA RECUPERAÇÃO PROFUNDA DE PAVIMENTOS: ESTUDO DE CASO DA BR-381/MG
⌚ 10:40	TT059	AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO DOSADAS COM 100% DE RAP E EMULSÕES ASFÁLTICAS CONVECIONAL E MODIFICADA
⌚ 11:00	EC657	PROPOSTA DE ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO IN SITU COM EMULSÃO ASFÁLTICA: ESTUDO DE CASO EM UMA VIA URBANA DE CURITIBA/PR
⌚ 11:20	TT290	ANÁLISE DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS EM MISTURAS DE RAP, SOLO ARGILOSO E CIMENTO PORTLAND
⌚ 11:40	TT540	AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS SOLO-RAP PELO ENSAIO DE MULTISTÁGIOS
⌚ 12:00	TT280	O USO DO RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO (RPA) NA ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS GEOTÉCNICAS DE PAVIMENTOS



AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS COM A INCORPORAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS FRESADOS

Jeovanesa Régis Carvalho¹; Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena²; Rita Flávia Régis Queiroz³; Yury Ouriques Rodrigues⁴

RESUMO

Com a legislação ambiental cada vez mais rigorosa, o desenvolvimento sustentável tornou-se uma questão importante na indústria da pavimentação. Portanto, a reciclagem de revestimentos asfálticos fresados (RAP) é uma tecnologia amplamente aprovada. No entanto, existem limitações para a utilização de teores mais elevados de RAP nas misturas asfálticas. Pois, o material do RAP contém ligantes asfálticos envelhecidos. Uma das técnicas convencionais para melhorar o desempenho dessas misturas é utilizar o RAP com as tecnologias de Misturas Asfálticas Mornas (MAM), uma vez que as MAMs podem melhorar a baixa trabalhabilidade do RAP a partir da redução da viscosidade do ligante asfáltico envelhecido. Sendo assim, este trabalho analisou o desempenho de duas tecnologias (óleo de girassol, aditivo químico) disponíveis no mercado para a fabricação de MAMs com diferentes porcentagens de material fresado, como forma de viabilizar a reciclagem de RAP em maiores taxas de participação da mistura final. De maneira geral, os resultados indicaram que o aumento do teor de RAP ocasionou o incremento da rigidez das misturas asfálticas recicladas. No entanto, observou-se que o óleo de girassol possibilitou maior redução da rigidez dessas misturas, atuando assim como rejuvenescedores do ligante do RAP. Já o aditivo químico atuou melhorando a adesividade das misturas asfálticas.

PALAVRAS-CHAVE: reciclagem de pavimentos; misturas mornas; misturas asfálticas recicladas mornas.

ABSTRACT

With increasingly stringent environmental legislation, sustainable development has become an important issue in the paving industry. Therefore, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is a widely approved technology. However, there are limitations to the use of higher levels of RAP in asphalt mixtures. This is because the RAP material contains aged asphalt binders. One of the conventional techniques for improving the performance of these mixtures is to use RAP with Warm Mix Asphalt (WMA) technologies, since WMAs can improve the low workability of RAP by reducing the viscosity of the aged asphalt binder. Therefore, this work analyzed the performance of two technologies (sunflower oil, chemical additive) available on the market for the manufacture of WMA with different percentages of milled material, as a way of making it possible to recycle RAP at higher participation rates in the final mix. In general, the results indicated that increasing the RAP content led to an increase in the stiffness of the recycled asphalt mixtures. However, it was observed that sunflower oil led to a greater reduction in the stiffness of these mixtures, thus acting as a rejuvenator for the RAP binder. The chemical additive improved the adhesion of the asphalt mixtures.

KEY WORDS: paving recycling; warm mix asphalts; warm mix recycled asphalt.

¹ Universidade Federal de Sergipe - UFS, e-mail: jeovanesaregis@gmail.com

² Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, e-mail: lucenafb@uol.com.br

³ Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, e-mail: flaviarq18@gmail.com

⁴ Universidade de São Paulo - USP, e-mail: yury_ouriques@usp.br



INTRODUÇÃO

Com a legislação ambiental cada vez mais rigorosa, o desenvolvimento sustentável tornou-se uma questão importante na indústria da pavimentação. Misturas asfálticas mornas (MAMs) e a reciclagem de revestimentos asfálticos fresados (RAP) são duas tecnologias amplamente aprovadas. As MAMs podem ser misturadas e compactadas em temperaturas mais baixas para reduzir o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (BEHNOOD, 2020). Já o material do RAP pode substituir uma certa proporção de agregados e ligante asfálticos necessários em pavimentos asfálticos recém-construídos, o que pode realizar a reciclagem de recursos e reduzir os custos de produção (GUO *et al.*, 2020; PASETTO *et al.*, 2021; DE MEDEIROS MELO NETO *et al.* 2022).

No entanto, existem limitações para a utilização de teores mais elevados de RAP nas misturas asfálticas. Pois, o material do RAP contém ligantes asfálticos envelhecidos. Uma das principais limitações do uso de RAP em pavimentos asfálticos é o envelhecimento secundário do ligante do RAP durante o processo de aquecimento e mistura na usina de asfalto. Vários métodos foram investigados para compensar essas deficiências e algumas soluções viáveis foram introduzidas. Uma das técnicas convencionais para melhorar a compatibilidade é utilizar o RAP com a tecnologia de MAM (KEYMANESH *et al.*, 2023).

Vários estudos foram realizados para avaliar o efeito das misturas asfálticas recicladas mornas (MARMs) quanto aos aspectos de sustentabilidade relacionados ao uso de alto teor de RAP e a redução da demanda energética com adição de aditivos de MAMs (RAHMAN *et al.*, 2021; GUO *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2021). Os pesquisadores concluíram que a incorporação do RAP na tecnologia MAM pode efetivamente diminuir o envelhecimento secundário dos materiais do RAP durante a produção de misturas asfálticas (ABD, 2017; VISHAL *et al.*, 2020). Temperaturas de produção mais baixas reduzem o envelhecimento secundário das misturas com RAP durante a mistura e a compactação. A redução da viscosidade da MAM permite a aplicação de altos teores de RAP sem impactar negativamente a trabalhabilidade dos pavimentos. Além disso, a combinação do RAP e a MAM pode criar um pavimento sustentável com desempenho equivalente aos pavimentos asfálticos convencionais (HETTIARACHCHI *et al.*, 2019).

As tecnologias de MAMs podem ser classificadas em: aditivos orgânicos, aditivos químicos e a tecnologia de asfalto espumado (CHERAGHIAN *et al.*, 2020). A influência que diferentes aditivos de MAMs (orgânico, químico e asfalto espumado) têm sobre o comportamento de ligantes e misturas asfálticas com alto teor de material fresado ainda não são bem conhecidos. Portanto, diferentes tecnologias de MAMs apresentam diferentes vantagens, o uso de MAM apresenta seis vantagens principais, que podem ser resumidas em vantagens: ambientais, de segurança, econômicas, de pavimentação, de desempenho e de produção (NITHINCHARY, DHANDAPANI & MULLAPUDI, 2024).

Para utilizar com segurança maiores teores de RAP em misturas asfálticas recicladas, mais investigações são essenciais para preencher a lacuna relativa ao desempenho das misturas asfálticas recicladas, especialmente quando se utilizam MAMs como agentes rejuvenescedores. Sendo assim, esta pesquisa tem como objetivo analisar duas tecnologias (óleo de girassol, aditivo químico) disponíveis no mercado para a fabricação de misturas asfálticas mornas com diferentes porcentagens de material fresado, como forma de viabilizar a reciclagem de RAP em maiores taxas de participação da mistura final.



DOI: 10.29327/1430212.49-40

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS COM A INCORPORAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS FRESADOS

MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico descreve os materiais utilizados nesta pesquisa para compor as misturas asfálticas recicladas mornas e quentes. São apresentados também os procedimentos realizados para avaliar o desempenho mecânico das misturas asfálticas.

Ligante asfáltico

O ligante asfáltico de classificação 50/70 foi utilizado para compor as misturas asfálticas. A escolha deste tipo de ligante foi estabelecida pelo fato deste ser o mais utilizado na Região Nordeste do Brasil. Os procedimentos realizados para caracterizar o ligante asfáltico foram o ensaio de penetração por meio do método de ensaio DNIT 155:2010 – ME, ponto de amolecimento por meio da norma DNIT 131:2010 – ME e viscosidade rotacional por meio da norma NBR 15184:2005. A Tabela 1 os resultados dos ensaios de reologia empírica dos ligantes asfálticos puro e modificados por aditivos de MAMs.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de reologia empírica dos ligantes asfálticos puro e modificados antes e após o procedimento de Rolling Thin Oven Test (RTFO)

Ensaio antes do RTFO					
		Ligante 50/70	Ligante + aditivo químico	Ligante + óleo de girassol	Limites - CAP 50/70 (DNIT 095:2006)
Penetração (0.1 mm)		66,3	59,3	92,8	50 - 70
Ponto de amolecimento (°C)		48,3	50,5	46,2	≥ 46
Índice de susceptibilidade térmica (IST)		-0,97	-0,66	-0,64	(-1,5) a (+0,7)
Viscosidade rotacional (cP)	135 °C	375,00	377,50	295,00	≥ 274
	150 °C	187,50	189,00	152,50	≥ 50
	177 °C	69,25	70,00	67,75	30 a 150
Ensaio após o RTFO					
Penetração (0.1 mm)		29	38,8	55,0	-
Porcentagem de Penetração retida (%)		43,7	65,3	59,3	≥ 55
Ponto de amolecimento (°C)		53,5	54,3	50,3	≥ 46
Variação do ponto de amolecimento (°C)		5,3	3,8	4,1	≤ 8
Viscosidade rotacional (cP)	135 °C	531,3	535,0	476,3	-
	150 °C	255,0	255,5	229,5	-
	177 °C	88,8	88,0	81,8	-
Variação de massa do ligante (%)		0,064	0,062	0,102	≤ 0,5

O procedimento de RTFO simula o envelhecimento de um ligante asfáltico devido a uma combinação de reações de oxidação e volatilização. Após o procedimento de RTFO, verificou-se que os ligantes foram envelhecidos e por isso apresentaram redução da penetração e aumento do ponto de amolecimento. Isto indica que o teor de asfaltenos aumentou, enquanto o teor de aromáticos e resinas diminuiu com o envelhecimento. O aumento do teor de asfaltenos leva o asfalto a tornar-se mais rígido, ou seja, mais duro (JONI *et al.*, 2019). Este aumento da rigidez do ligante asfáltico pode



Jeovanesa Régis Carvalho,
Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena,
Rita Flávia Régis Queiroz,
Yury Ouriques Rodrigues

melhorar a resistência à deformação permanente, porém, pode ocasionar problemas de trincamento e trincas por fadiga (GE *et al.*, 2017).

O ligante 50/70 apresentou a penetração retida inferior ao preconizado por norma, indicando que ele tem maior tendência de oxidação e aumento de rigidez. Enquanto que o óleo de girassol e o aditivo químico atuaram melhorando esta propriedade, atendendo ao especificado por norma com penetração retida superior ao valor mínimo.

Agregados

Os agregados graúdos utilizados nessa pesquisa foram a brita 12,5mm e a brita 19mm. Os agregados miúdos empregados foram areia e pó de pedra. As propriedades físicas dos agregados são apresentadas na Tabela 2, os resultados se encontraram dentro dos limites especificados.

Tabela 2 - Massa específica real e aparente e absorção dos agregados graúdos e miúdo

Teste	Especificação	Limites	Resultados			
			Brita 19mm	Brita 12,5mm	Pó de pedra	Areia
Massa específica real, g/cm ³	DNIT 413:2019 – ME, DNIT 411/2021 - ME	-	2,77	2,78	2,70	2,50
Massa específica aparente, g/cm ³	DNIT 413:2019 – ME, DNIT 411/2021 - ME	-	2,74	2,73	2,56	2,38
Absorção, %	DNIT 413:2019 - ME	≤ 2	0,39	0,60	0,36	0,26
Índice de forma	DNIT 424:2020 - ME	≥ 0,5	0,88	0,74	-	-
Equivalente areia	DNIT 054:1997 - ME	≥ 55%	-	-	56,0%	86,39%
Partículas planas e alongadas, %	DNIT 429:2020 - ME	≤ 5	1,07	1,0	-	-
Partículas fraturadas, %	DNIT 430:2020 - ME	≥ 90	100	100	-	-

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado nos agregados graúdos. Sendo realizado de acordo com a norma do DNIT-ME 035:1998. A brita 19 mm apresentou um desgaste Los Angeles de 21,01%, valor de acordo com a especificação do DNIT – ME 031:2006, que recomenda valor máximo igual ou inferior a 50%. Portanto, a brita 19 mm utilizada nesta pesquisa atende ao critério estabelecido.

Óleo de girassol

O aditivo orgânico de MAM utilizado foi o óleo de girassol da marca Liza, este foi obtido no comércio local. Baseado no desempenho mecânico apresentado no estudo de Carvalho (2018), foi adotado o teor de 2% de óleo de girassol, adicionado em peso de ligante.

Aditivo químico

O aditivo químico de MAM utilizado foi o WarmGrip® N1, fornecido pela ArrMaz do Brasil Ltda. que pertencente ao grupo ARKEMA. A Tabela 3 apresenta a caracterização física do aditivo químico.



DOI: 10.29327/1430212.49-40

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS
COM A INCORPORAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS FRESADOS**
Tabela 3 - Caracterização física do aditivo químico

Propriedade	Descrição
Aspecto, 25° C	Líquido de cor escura
Odor	Amina
Densidade, 25 °C	1,0 kg/L
Viscosidade, 25°C	1.650 cP
Registro, Avaliação, Autorização e Restrição de Produtos Químicos (REACH)	Adequado

Baseado no trabalho de Wargha Filho (2013), foi adotado para este trabalho o teor de 0,4% de aditivo químico adicionado em peso de ligante total na mistura.

RAP

A coleta do RAP foi realizada em um estoque de material fresado localizado no trecho do km 35,7 ao km 42,0 da pista no sentido crescente e decrescente da BR 230, pertencente ao DNIT de Santa Rita-PB. O estoque não apresentava vestígios de outros tipos de materiais como, por exemplo, concreto ou solo.

A extração e recuperação do ligante asfáltico do RAP foi realizada com o objetivo de caracterizá-lo reologicamente. O ensaio de extração foi realizado seguindo as recomendações da norma ASTM D2172:2017. O solvente utilizado foi o tricloroetileno, indicado na norma ASTM D2172:2017 e DNIT 158:2011-ME.

Para separação do ligante do RAP dos agregados dele, foi adotada a metodologia de ensaio de extração do ligante asfáltico baseado no estudo de Gonçalves *et al.* (2019), seguindo a norma ASTM D2172:2017. Além disso, foi realizado a recuperação do ligante do RAP por meio do rotaevaporador, sendo normatizado pela ASTM D 5404:2012. Após a recuperação do ligante foram verificados o teor de ligante médio dos materiais bem como as propriedades do ligante recuperado (PG, penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, MSCR). Para a determinação do valor de PG do ligante do RAP foi utilizado os valores de DSR do ligante envelhecido, onde $G^*/\sin\delta$ é de 2,20kPa, o PG foi obtido apenas para a temperatura alta, e não para a temperatura baixa. Para o ensaio de MSCR, as amostras foram testadas de acordo com a norma ASTM D7405:2020 executados na temperatura de 70°C. A Tabela 4 apresenta a caracterização física do ligante do RAP.

Tabela 4 - Caracterização física do ligante do RAP

Característica	Ligante Do RAP	Norma
Penetração (0,1mm)	5,0	DNIT 155:2010
Ponto de amolecimento (°C)	90,5	DNIT 131:2010
PG (°C)	82	ASTM D 6373:2021
Viscosidade Rotacional 135 °C (cp)	10688	ASTM D4402:2015
Viscosidade Rotacional 150 °C (cp)	3944	
Viscosidade Rotacional 177 °C (cp)	775	
Jnr 0.1 (kPa-1)	0,0094	ASTM D7405:2020
Jnr 3.2 (kPa-1)	0,010	
Jnr diff (%)	7,36	
R0.1 (%)	49,90	
R3.2 (%)	48,90	
R diff (%)	2,01	



Jeovanesa Régis Carvalho,
Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena,
Rita Flávia Régis Queiroz,
Yury Ouriques Rodrigues

O ligante asfáltico oriundo do RAP apresentou uma temperatura máxima de PG de 82 °C. Os elevados valores de viscosidade e o baixo valor de penetração indicam um elevado grau de rigidez. A elevada rigidez que o RAP apresenta, revela a necessidade da utilização de agentes rejuvenescedores do ligante asfáltico do RAP para melhorar o desempenho das misturas com relação ao trincamento por fadiga.

Dosagem das misturas asfálticas recicladas

A pesquisa consistiu em realizar a dosagem da mistura de referência com 0% de RAP e com o ligante asfáltico convencional o CAP 50/70. Para isso, foi realizada a escolha de três composições granulométricas com os agregados disponíveis, uma superior, uma intermediária e uma inferior que se encontram dentro da Faixa C de granulometria do DNIT. Em seguida, foram avaliadas as Misturas Asfálticas Recicladas Quentes (MARQs) com o ligante convencional, variando-se apenas o teor de fresado em 30% e 50%.

As granulometrias das MARQs e das Misturas Asfálticas Recicladas Mornas (MARMs) são iguais quando se mantém constantes as quantidades de fresado durante as dosagens, portanto, não foram realizadas as dosagens para as misturas recicladas modificadas pelos aditivos de MAMs. Foram adotadas como referências os resultados das MARQs.

Foi empregada a metodologia SUPERPAVE para a realização das dosagens das misturas asfálticas. A compactação dos corpos de provas foi realizada por amassamento com o auxílio do compactador giratório segundo a norma ASTM D 6925:2009. O processo de produção do ligante modificado com o óleo de girassol foi realizado conforme as instruções da pesquisa de Carvalho (2018). Onde, o ligante foi inicialmente aquecido a uma temperatura de 135°C sendo mantida a temperatura de mistura constante. O tempo de mistura foi de 20 minutos, o teor de óleo de girassol foi adicionado gradativamente ao ligante, a uma velocidade máxima de 410 rpm no misturador mecânico. Já a mistura do ligante com o aditivo químico seguiu as recomendações de Oliveira (2013) e Wargha Filho (2013), onde a mistura foi submetida à uma rotação de 1.500 rpm por 20 minutos em uma temperatura de 130 °C.

Para as misturas recicladas foi utilizada como parâmetro a curva intermediária que atendeu aos critérios da dosagem SUPERPAVE da mistura de referência. Não houve qualquer processamento ou beneficiamento do RAP para a produção das misturas asfálticas. A Tabela 5 apresenta as proporções de agregados nas granulometrias e as curvas granulométricas finais das misturas com os teores de 0, 30 e 50% de RAP.

Tabela 5 - Proporções de agregados nas granulometrias das misturas recicladas

RAP	Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Areia	Pó de pedra	Filler
0%	15%	35%	6%	42%	2%
30%	14%	26%	3%	25%	2%
50%	9%	23%	3%	13%	2%

Após a escolha das curvas granulométricas, foi realizada a compactação SUPERPAVE visando obter um projeto de mistura com volume de vazios de 4%. Em seguida foi realizado o ensaio para determinação da densidade da mistura por meio do método de Rice Test. As porcentagens dos teores de ligantes novos para as misturas recicladas foram obtidos por meio do teor de ligante do material fresado de 5,6%, obtido na caracterização do RAP. Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas: volume de vazios (VV), volume de vazios nos

DOI: [10.29327/1430212.49-40](https://doi.org/10.29327/1430212.49-40)
**AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS
COM A INCORPORAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS FRESADOS**

agregados minerais (VAM), e a relação betume/vazios (RBV). Estes parâmetros permitiram a definição do teor de projeto, o qual foi usado na composição das misturas asfálticas recicladas para a avaliação das propriedades mecânicas. Observa-se que, conforme a Norma da ASTM D2041/D2041M:2019, que as misturas atenderam às especificações.

Tabela 6 - Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas

Mistura	Teor de ligante virgem (%)	Teor de ligante total (%)	%gmm	VAM (%)	VV (%)	RBV (%)
0% (Ref)	5,20	5,2	95,75	14,18	4,0%	71,69
30% RAP	3,72	5,4	95,05	16,24	4,1%	74,76
50%RAP	2,90	5,7	95,07	16,72	4,1%	74,06
Crítérios	-	-	96	13 mín	4,00	65 a 75

Pode-se observar que a quantidade de ligante virgem adicionada às misturas, com base nos vazios de 4%, foi superior ao teor de ligante de 5,2% adicionado na mistura de referência, indicando assim que a ativação do ligante não foi completa. Logo, o ligante presente no RAP atua como “partial blending”, ou seja, apenas uma parcela do ligante do RAP interage com o ligante asfáltico virgem. Assumindo-se que as misturas deveriam ter 5,2% de teor de ligante total, observa-se que a mistura contendo 30% de RAP apresentou uma ativação do ligante do RAP de 96,16%, já a mistura com 50% de RAP apresentou uma ativação 90,38%.

No entanto, apesar da ativação parcial do ligante proveniente do RAP ser provavelmente o principal motivo para as misturas com um teor mais elevado de RAP necessitarem de mais ligante total, a ativação pode não ter sido o único fator. O fato de as misturas com maior teor de RAP conter ligantes mais envelhecidos, faz com que as misturas sejam mais resistentes à compactação, necessitando de um teor de ligante maior. Além disso, a temperatura de compactação também pode ser um fator contribuinte para a menor ativação do ligante do RAP.

Temperaturas de usinagem e compactação

Segundo o NCHRP Report 648 (2010), as temperaturas de usinagem compactação das misturas asfálticas são determinadas dentro das faixas de viscosidade de 170 ± 20 cP e 280 ± 30 cP, respectivamente. Logo, as temperaturas de usinagem e compactação para a MQ0 foram obtidas por meio da curva de viscosidade do ligante virgem CAP 50/70 (153°C). Os agregados virgens foram aquecidos convencionalmente, 10°C acima da temperatura normal do ligante (à 163°C). A mistura não-compactada permaneceu em estufa, à temperatura de compactação por um período de 2 horas antes da compactação, com o objetivo de simular o envelhecimento de curto prazo durante a usinagem.

Devido a elevada viscosidade do ligante extraído do RAP, não é possível determinar uma temperatura de usinagem para o ligante do RAP com as temperaturas ensaiadas. Logo, com base na literatura (GENNESSEAU, 2015; BOHN, 2017), tanto para as MARQs quanto para as MARMs o RAP foi aquecido até atingir a temperatura de 110°C, durante um período de 2 horas, de modo a simular o pré-aquecimento em usinas adaptadas com tambor secador especial para material reciclado.

Para as MARQs, a determinação da temperatura do ligante virgem CAP 50/70 foi obtida pelo ensaio de viscosidade (153°C). Os agregados virgens foram aquecidos convencionalmente, 10°C acima da



Jeovanesa Régis Carvalho,
Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena,
Rita Flávia Régis Queiroz,
Yury Ouriques Rodrigues

temperatura normal do CAP (à 163°C), finalmente essas misturas apresentaram uma temperatura final de compactação de 142°C.

Baseado no trabalho de Wargha Filho (2013), as temperaturas aplicadas para as misturas com os ligantes modificados com óleo de girassol e aditivo químico foram reduzidas em 20°C da temperatura obtida no ensaio de viscosidade, com o objetivo de simular a temperatura de uma típica MAM. A Tabela 7 apresenta as temperaturas utilizadas na produção dos corpos de provas para realização dos ensaios mecânicos.

Tabela 7 - Temperaturas de usinagem e compactação

Temperatura	MARQ	MARM + aditivo químico	MARM + óleo de girassol
RAP	110	110	110
Ligante	153	133	127
Agregados virgens (°C)	163	143	137
Compactação (°C)	142	120	110-120

Caracterização mecânica

Para caracterização mecânica foram realizados os seguintes ensaios mecânicos: Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral (RT) de acordo com a norma do DNIT 136/2018 – ME, Módulo de Resiliência (MR) de acordo com a norma do DNIT 135/2018 – ME e dano por umidade induzida (Lottman Modificado) de acordo com a norma do DNIT 180/2018 – ME.

RESULTADOS

Neste tópico são analisados os efeitos dos aditivos de MAMs sobre as propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas.

Resistência à tração indireta por compressão diametral

A Figura 1 apresenta os valores médios da resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas estudadas nesta pesquisa.

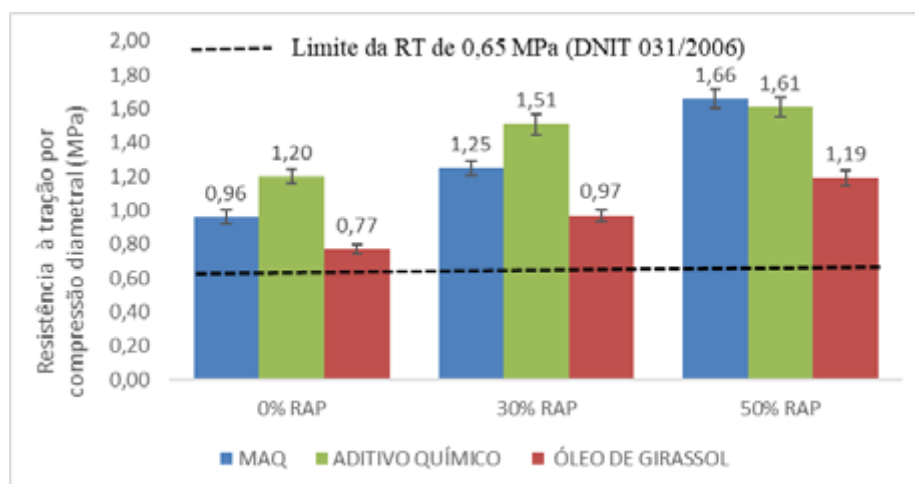


Figura 1 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral



DOI: 10.29327/1430212.49-40

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS
COM A INCORPORAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS FRESADOS

Todas as misturas atenderam ao critério da norma do DNIT - ME 031:2006, de um valor mínimo de 0,65 MPa (a 25°C), em misturas asfálticas destinadas a camadas de rolamento. Verifica-se que a resistência à tração aumentou conforme foi elevado o teor de RAP nas misturas. Uma resposta semelhante foi relatada por outros autores (FAKHRI & AHMADI, 2017; OMRANIAN *et al.*, 2018), onde um aumento no valor de RT foi observado com teor crescente de RAP para misturas asfálticas com e sem aditivos de MAMs.

Entende-se que o aumento do percentual de RAP proporciona um aumento da rigidez das misturas asfálticas recicladas. Isso ocorre devido ao processo de oxidação, o teor de ligante do RAP endurece durante sua vida útil, tornam a rigidez das misturas asfálticas recicladas maior em comparação com as misturas convencionais. Além disso, essa elevação da rigidez pode ser negativa para a mistura, uma vez que o aumento da resistência ocorreu devido ao acréscimo do percentual de ligante oxidado do RAP, que torna as misturas mais frágeis e propensas a trincas por fadiga.

O óleo de girassol reduziu o valor da RT quando comparado com os mesmos teores de RAP das misturas a quente. Os valores de RT mais baixos indicam seu comportamento flexível. Essa redução da RT está associada com a diminuição da temperatura de compactação e que resulta na redução da capacidade de carga das misturas (OMRANIAN *et al.*, 2018). Ainda de acordo com estes autores, esta redução também pode ser atribuída à capacidade que a MAM tem de compensar os efeitos do ligante envelhecido presente no RAP.

No entanto, as misturas modificadas com o aditivo químico nos teores de 0% e 30% de RAP aumentaram os valores da RT quando comparadas com as misturas recicladas a quente. Enquanto que as com 50% de RAP modificadas com aditivo químico apresentaram resistência próximas da mistura a quente. Portanto, pode-se verificar que o aditivo químico não atuou rejuvenescendo o ligante do RAP e as misturas modificadas com esse aditivo.

Módulo de resiliência

A Figura 2 apresenta os resultados dos valores médios do ensaio de módulo de resiliência (MR) a 25°C, referentes à 10% da carga da RT das misturas estudadas nesta pesquisa.

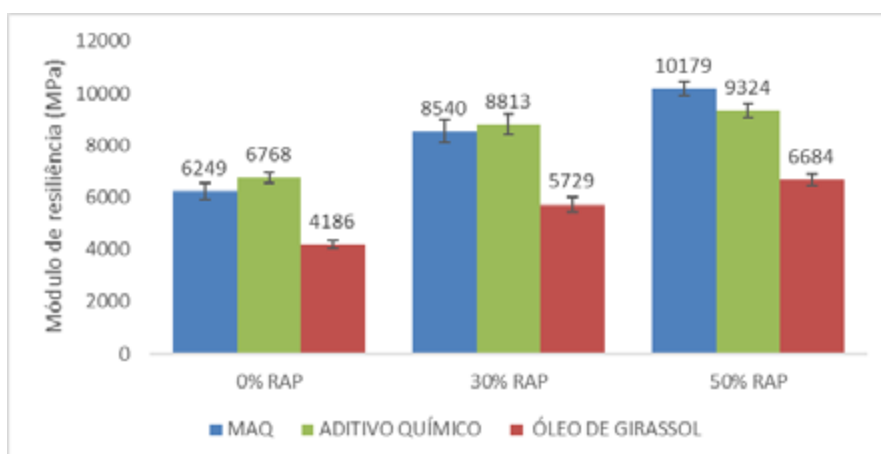


Figura 2 - Resultados do ensaio de MR

Verifica-se a influência do RAP na rigidez das misturas, o módulo de resiliência, assim como a resistência à tração, aumentou com o aumento do teor de RAP nas misturas. O maior aumento da rigidez ocorreu para a mistura com o CAP puro.



Jeovanesa Régis Carvalho,
Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena,
Rita Flávia Régis Queiroz,
Yury Ouriques Rodrigues

Além disso, percebe-se que a adição de ligante do RAP aumentou a rigidez das MARMs. De acordo com Martinho, Picado-Santos & Capitão (2017), esse aumento da rigidez pode tornar as misturas rígidas e quebradiças que afetam negativamente o desempenho em baixas temperaturas das MARMs. Por outro lado, deve-se levar em conta que a taxa de trinca por fadiga e maior suscetibilidade à fratura das misturas asfálticas não é determinada apenas pela rigidez, mas também por parâmetros como valores de módulo resultantes da caracterização viscoelástica, volume de vazios, adesão e coesão da mistura.

Dano por umidade induzida

A Figura 3 apresenta os resultados dos valores de Resistência Retida à Tração (RRT).

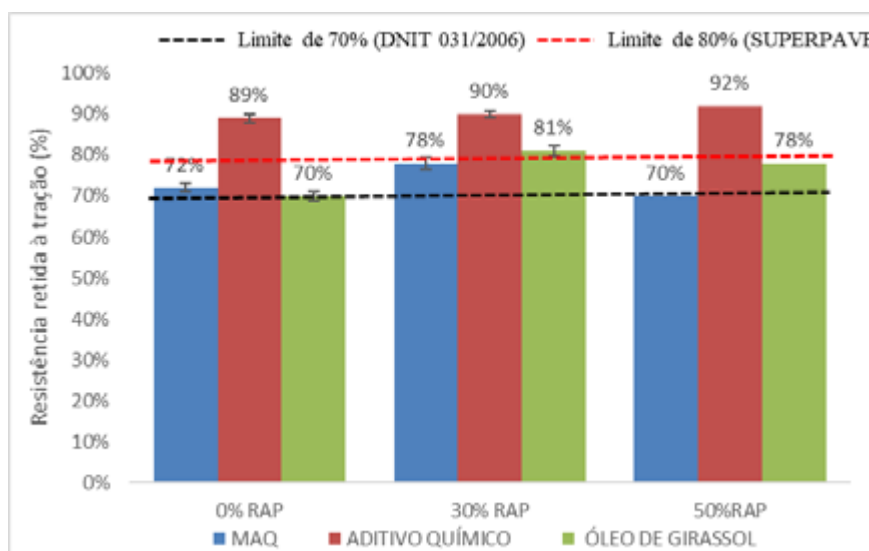


Figura 3 - Resultados do ensaio de dano por umidade induzida

Para a metodologia SUPERPAVE, o valor de RRT mínimo para que a susceptibilidade à umidade da mistura asfáltica seja considerada aceitável é 80%. Já a especificação de serviço do DNIT 031/2006, preconiza uma RRT mínima de 70% para misturas asfálticas. Verifica-se que todas as misturas asfálticas satisfizeram esse critério. Os aditivos de MAMs combinados com os teores de RAP, analisados nesta pesquisa, atuaram melhorando essa propriedade.

Sabe-se que o agregado empregado neste trabalho é o granítico, reconhecido por ter fraca adesividade com o ligante asfáltico. Logo, o aditivo químico, atuou melhorando essa propriedade possibilitando a produção de misturas mais duráveis, especialmente na região Nordeste, onde este tipo de agregado prevalece.

Segundo Goli & Latifi (2020), a resistência retida à tração da mistura asfáltica é uma característica importante que representa as propriedades coesivas e adesivas do ligante e da interface ligante-agregado, portanto, quanto maior a RRT melhor será a resistência à ação deletérea da água. O aumento na resistência à umidade pode ter ocorrido principalmente porque o ligante envelhecido do RAP e os agregados do RAP apresentaram uma ligação mútua mais forte do que o ligante asfáltico virgem e o agregado natural impedindo assim a entrada de água na interface. Além disso, esse aumento da resistência à umidade das misturas asfálticas recicladas pode ter sido devido os agregados reciclados já serem revestidos com ligante asfáltico. Assim, a penetração de água é limitada nas



DOI: [10.29327/1430212.49-40](https://doi.org/10.29327/1430212.49-40)

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS COM A INCORPORAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS FRESADOS

partículas de RAP, o que as torna mais resistentes à desagregação do que as misturas asfálticas convencionais.

CONCLUSÃO

De maneira geral, o aumento do teor de RAP ocasionou o incremento da rigidez das misturas asfálticas recicladas, esse fato pode ser explicado devido ao acréscimo do teor de ligante oxidado oriundo do RAP. Ao mesmo tempo, a incorporação do RAP proporcionou o acréscimo da resistência ao dano por umidade induzida das misturas asfálticas. Considerando o método de produção de MAM (orgânico, químico) mais adequado para compor misturas asfálticas recicladas, observou-se que o aditivo orgânico (óleo de girassol) possibilitou maior redução da rigidez das misturas asfálticas recicladas, atuando assim como rejuvenescedores do ligante do RAP. No entanto, o aditivo químico atuou melhorando a adesividade das misturas asfálticas, mesmo nas misturas com alto teor de RAP, prolongando a vida útil do pavimento, protegendo-o contra desgaste e danos causados pela umidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD, DURAJD MUAYED (2017). Characterisation of Warm Asphalt Mixtures with Addition of Reclaimed Asphalt Pavement Materials. University of Liverpool.

BEHNOOD, A. (2020). A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties. *Journal of Cleaner Production*, 120817. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120817

BOHN, K. A. (2017). *Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas com Uso de Ligantes Convencional e Modificado por Polímero*. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.

CARVALHO, J. R. (2018). *Estudo do Comportamento do Asfalto Modificado Com Óleo de Girassol Visando à Obtenção de Misturas Mornas*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba, Brasil.

CHERAGHIAN, G., CANNONE FALCHETTO, A., YOU, Z., CHEN, Y. S., KIM, J, WESTERHOFF, K. H., WISTUBA, MP (2020). Warm mix asphalt technology: An up to date review. *Journal of Cleaner Production*, 122128. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122128

DE MEDEIROS MELO NETO O, MINERVINA SILVA I, DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA LC, *et al* (2022) Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid. *Construction and Building Materials* 349:128728. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128728

FAKHRI, M., & HOSSEINI, S.A. (2017). *Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporating high rap proportion*. *Construction and Building Materials*, 134, 626–640.

GE, D.; YAN, K.; YOU, L.; WANG, Z. (2017). *Modification mechanism of asphalt modified with sasobit and polyphosphoric acid (PPA)*. *Construction and Building Materials*, v. 143, p. 419- 428.

GENNESSEAU, M. M. L. (2015). *Avaliação da Durabilidade de Misturas Asfálticas a Quente e Mornas Contendo Material Asfáltico Fresado*. Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

GOLI, H., & LATIFI, M. (2020). *Evaluation of the effect of moisture on behavior of warm mix asphalt (WMA) mixtures containing recycled asphalt pavement (RAP)*. *Construction and Building Materials*, 247, 118526. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118526

GONÇALVES, B. C. S.; PEREIRA, D. S.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B. (2019). *Avaliação da centrífuga rotarex na determinação do teor de ligante e granulometria de diferentes concretos asfálticos*. *Revista Transportes*, v. 28, n. 3, p. 75-90.



Jeovanesa Régis Carvalho,
Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena,
Rita Flávia Régis Queiroz,
Yury Ouriques Rodrigues

GUO, M., LIU, H., JIAO, Y., MO, L., TAN, Y., WANG, D., & LIANG, M. (2020). Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, 121704. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121704

HETTIARACHCHI, C.; HOU, X.; WANG, J.; XIAO, F. (2019). A comprehensive review on the utilization of reclaimed asphalt material with warm mix asphalt technology. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117096

JONI, H. H., AL-RUBAEE, R. H. A., & AL-ZERKANI MAHDI A. (2019). *Rejuvenation of Aged Asphalt Binder Extracted from Reclaimed Asphalt Pavement Using Waste Vegetable and Engine Oils*. *Case Studies in Construction Materials*, e00279. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00279

KEYMANESH, MAHMOUD REZA; AMANI, SAEED; OMRAN, ALI TAGHINEZHAD & KARIMI, MOHAMMAD M. (2023). Evaluation of the impact of long-term aging on fracture properties of warm mix asphalt (WMA) with high RAP contents. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132671

NITHINCHARY, J.; DHANDAPANI, BHUVANA PRIYA; MULLAPUDI, RAMYA SRI. (2024). Application of warm mix technology - design and performance characteristics: Review and way forward. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134915

OLIVEIRA, J. A. (2013). *Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e em campo*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

OMRANIAN, S. R., HAMZAH, M. O., GUNGAT, L., & TEH, S. Y. (2018). *Evaluation of asphalt mixture behavior incorporating warm mix additives and reclaimed asphalt pavement*. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(3), 181–196. DOI: 10.1016/j.jtte.2017.08.003

PASETTO, M., BALIELLO, A., GIACOMELLO, G., & PASQUINI, E. (2021). Towards very high RAP content asphalt mixes: A comprehensive performance-based study of rejuvenated binders. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.12.007

RAHMAN, MPHAMMAD ASHIQUR; ZAMAN, MUSHARRAF; ALI, SYED ASHIK; GHABCHI, ROUZBEH & GHOS, SAGAR. (2021). Evaluation of mix design volumetrics and cracking potential of foamed Warm Mix Asphalt (WMA) containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). DOI: 10.1080/10298436.2021.1902522

VISHAL, U.; CHOWDARY, V.; PADMAREKHA, A.; MURALI KRISHNAN, J. (2020). Influence of moisture damage on fatigue of warm mix and hot mix Asphalt mixture. *J. Mater. Civ. Eng.*, 32. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003321

WANG, DI; RICCARDI, CHIARA; JAFARI, BABAK; FALCHETTO, AUGUSTO CANNONE; WISTUBA, MICHAEL P. (2021). Investigation on the effect of high amount of Re-recycled RAP with Warm mix asphalt (WMA) technology. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125395

WARGHA FILHO, N. (2013). *Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas*. Dissertação de Mestrado, Petran / UFC – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Transportes, Fortaleza, CE, Brasil.

WOSZUK, A., & FRANUS, W. (2017). *A Review of the Application of Zeolite Materials in Warm Mix Asphalt Technologies*. *Applied Sciences*, 7(3), 293. DOI: 10.3390/app7030293



APLICAÇÃO DE MATERIAL ESTABILIZADO COM EMULSÃO ASFÁLTICA (BSM) PARA RECUPERAÇÃO PROFUNDA DE PAVIMENTOS: ESTUDO DE CASO DA BR-381/MG

Raimi Costa da Silva¹; Thiago Gomes Galdino Leite¹; Diogo Bento de Moraes¹; Guilherme Rodrigues Linhares¹; Zila Maria Garcia Mascarenhas²; Kamilla Vasconcelos Savasini²; Celso Luiz dos Santo Romeiro Júnior¹; Mateus Wobeto¹

RESUMO

A reciclagem é uma técnica de recuperação utilizada há mais de 30 anos para a restauração da capacidade estrutural de pavimentos. Nesse contexto, o presente estudo de caso consiste no relato dos principais aspectos executivos da obra de reciclagem in situ com emulsão asfáltica realizada na rodovia BR-381/MG – Contorno de Betim, administrada pela Concessionária Fernão Dias. Tradicionalmente, o Grupo Arteris não empregava técnicas de reciclagem in situ em suas rodovias, no entanto, impulsionado por uma política interna voltada para práticas construtivas com menor impacto ambiental, mais especificamente na redução de emissões de gases do efeito estufa, optou-se pela reciclagem in situ como alternativa. O objetivo era maximizar a reutilização dos materiais existentes na rodovia e minimizar as atividades de transporte durante a obra. Diante das características do pavimento existente e das limitações operacionais da região, a escolha pela emulsão asfáltica visava mitigar os riscos de falha por fadiga típicos de bases cimentadas, além de possibilitar uma rápida liberação ao tráfego após a conclusão da obra. O estudo apresenta os aspectos mais relevantes do processo executivo, bem como os principais obstáculos enfrentados ao longo da obra. Desafios relacionados à heterogeneidade da estrutura existente e ao controle de qualidade foram superados e destaca-se que a solução adotada ofereceu vantagens em termos de agilidade, custo e logística.

PALAVRAS-CHAVE: pavimentação; reciclagem in situ; reconstrução

ABSTRACT

Recycling is a recovery technique used for over 30 years to restore the structural capacity of pavements. In this context, the present case study consists of reporting the main executive aspects of the *in situ* recycling work with asphalt emulsion carried out on the highway BR-381/MG - Contorno de Betim, managed by the Fernão Dias Concessionaire. Traditionally, the Arteris Group did not employ *in situ* recycling techniques on its highways; however, driven by an internal policy focused on construction practices with less environmental impact, specifically in reducing greenhouse gas emissions, *in situ* recycling was chosen as an alternative. The goal was to maximize the reuse of existing materials on the highway and minimize transportation activities during the work. Given the characteristics of the existing pavement and the operational limitations of the region, the choice of asphalt emulsion aimed to mitigate the risks of fatigue failure typical of cemented bases, as well as to allow quick traffic release after completion of the work. The study presents the most relevant aspects of the executive process, as well as the main obstacles faced during the work. Challenges related to the heterogeneity of the existing structure and quality control were overcome, and it is emphasized that the adopted solution offered advantages in terms of agility, cost, and logistics.

KEY WORDS: Pavement; in situ recycling, reconstruction

¹ Arteris Fernão Dias, raimi.silva@arteris.com.br; thiago.leite@arteris.com.br; diogo.morais@arteris.com.br; guilherme.linhares@arteris.com.br; celso.romeiro@arteris.com.br; mateus.wobeto@arteris.com.br.

² Universidade de São Paulo, kamilla.vasconcelos@usp.br; zilamascarenhas@usp.br.



Raimi Costa da Silva, Thiago Gomes Galdino Leite,
Diogo Bento de Morais, Guilherme Rodrigues Linhares,
Zila Maria Garcia Mascarenhas, Kamilla Vasconcelos Savasini,
Celso Luiz dos Santo Romeiro Júnior, Mateus Wobeto

INTRODUÇÃO

A reciclagem de pavimento com emulsão asfáltica é reconhecida como uma técnica promissora no contexto brasileiro para a melhoria e reabilitação de rodovias. Com o desafio crescente de manter e expandir a infraestrutura viária do país, a busca por soluções eficientes e sustentáveis torna-se fundamental. A reciclagem in situ, mais especificamente, oferece uma abordagem econômica e ambientalmente vantajosa, ao permitir a reutilização de materiais existentes na própria rodovia, minimizando assim os custos e impactos associados ao transporte de materiais virgens. O presente estudo de caso se propõe a apresentar o processo executivo da técnica de reciclagem in situ com emulsão asfáltica realizada na BR-381/MG- Contorno de Betim, bem como seus principais desafios.

CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO

O Contorno de Betim, escolhido como o segmento para a realização da obra, sobressai-se pela sua significativa importância como um corredor estratégico para a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) – com tráfego estimado em 9500 veículos comerciais/dia. O trecho faz parte da Concessionária Fernão Dias do Grupo Arteris, cuja localização estratégica ofereceu vantagens operacionais significativas, possibilitando a manutenção da faixa de trabalho fechada durante a execução da obra, minimizando os impactos no fluxo de veículos e garantindo a segurança dos usuários da via. Além disso, a proximidade do trecho com diversas bases logísticas, como distribuidores, refinarias, pedreiras e usinas, representou uma vantagem considerável na otimização do processo de construção e na redução de custos operacionais. É importante destacar que, apesar das vantagens oferecidas pelo local, o trecho foi escolhido por apresentar um nível elevado de criticidade estrutural (Figura 1).



Figura 1 – Trecho Experimental do Contorno de Betim antes da obra de reciclagem

Era de conhecimento prévio da Concessionária que boa parte do pavimento do Contorno de Betim era composto por camadas cimentadas, portanto optou-se pela reciclagem com emulsão asfáltica com o objetivo de diminuir os riscos de trincamento por fadiga. Em complemento, optou-se pelo desenvolvimento de uma emulsão asfáltica customizada aos materiais do local.

ETAPAS EXECUTIVAS

Ao todo foram executados cerca de 11 km de faixa com a solução de reciclagem in situ com emulsão asfáltica e 16 km de drenos de pavimento no Contorno de Betim, cuja duração foi de cerca de 79 dias. A seguir serão abordadas as principais etapas executivas do trecho experimental, começando com as sondagens de pavimento para avaliação das condições existentes. Em seguida, foi elaborado um projeto de mistura, levando em consideração as características do pavimento e os requisitos de



DOI: 10.29327/1430212.49-110

APLICAÇÃO DE MATERIAL ESTABILIZADO COM EMULSÃO ASFÁLTICA (BSM) PARA RECUPERAÇÃO PROFUNDA DE PAVIMENTOS:
ESTUDO DE CASO DA BR-381/MG

desempenho, e o dimensionamento da nova estrutura de pavimento. Posteriormente, foi realizada uma busca de fornecedores para os materiais e empreiteiros qualificados para a execução da obra. Durante a execução da obra, as atividades foram supervisionadas para assegurar a qualidade e o cumprimento dos padrões técnicos necessários.

Sondagens de pavimento

As sondagens foram realizadas para avaliar a composição e a condição da estrutura existente no local da obra. Tendo em vista a escolha da técnica de reciclagem in situ, essa etapa foi essencial para a definição da quantidade de projetos de mistura que deveriam ser desenvolvidos, a depender do tipo de material e da proporção de cada um deles. Em complemento, a sondagem foi realizada com uma fresadora (Figura 2), em busca de se obter materiais com uma característica similar à condição real da obra para realização do projeto de dosagem da mistura reciclada em laboratório. Foram realizadas nove sondagens ao total, cujos resultados podem ser visualizados na Tabela 1.



Figura 2 – Sondagens realizadas com a fresadora

Tabela 1 – Sondagens Contorno de Betim

Local	Tipo	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
0+200 Sul	Material	CAUQ	Solo brita	BGTC	Rachão
	Espessura (cm)	16,5	18	19	-
1+700 Sul	Material	CAUQ	BGTC	Solo arenoso vermelho	Solo argiloso
	Espessura (cm)	15	15	12	-
4+470 Sul	Material	CAUQ	Solo brita	Solo sem compactação	Argila
	Espessura (cm)	15	12	20	-
5+400 Sul	Material	CAUQ	BGTC	Solo brita	-
	Espessura (cm)	14	24	17	-
0+200 Norte	Material	CBUQ	BGTC	Argila vermelha	-
	Espessura (cm)	15	20	-	-
1+900 Norte	Material	CBUQ	BGTC	Argila vermelha	-
	Espessura (cm)	15	20	-	-
3+200 Norte	Material	CBUQ	BGTC	Argila vermelha	-
	Espessura (cm)	15	20	-	-
4+470 Norte	Material	CBUQ	BGTC	Canga	Argila
	Espessura (cm)	14	15	20	-
5+360 Norte	Material	CBUQ	BGTC	Canga	-
	Espessura (cm)	14	16	20	-



Raimi Costa da Silva, Thiago Gomes Galdino Leite,
Diogo Bento de Morais, Guilherme Rodrigues Linhares,
Zila Maria Garcia Mascarenhas, Kamilla Vasconcelos Savasini,
Celso Luiz dos Santo Romeiro Júnior, Mateus Wobeto

Projeto de mistura

Os materiais coletados na fase de sondagens foram enviados para a Distribuidora Greca Asfaltos, que não só elaborou os projetos de dosagem da BSM baseando-se na composição dos materiais do pavimento existente e nos horizontes de corte da recicladora in situ, mas também fez os ajustes necessários na formulação da emulsão para adequá-la aos materiais disponíveis. Os projetos seguiram a metodologia recomendada pela *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA, 2023), utilizando corpos de prova Marshall de 4" de diâmetro com adição de 1% de cimento Portland como filer ativo e diferentes taxas de emulsão asfáltica. Após a moldagem e a cura dos corpos de prova, foram realizados ensaios de Estabilidade Marshall e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) em condições secas e saturadas. O teor ótimo de adição de emulsão asfáltica foi determinado com base nas resistências mínimas alcançadas nos ensaios. Foram realizados quatro projetos, dos quais três foram utilizados no trecho experimental descrito posteriormente, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição dos projetos de mistura

Projeto	% em massa					
	RAP	BGTC	Solo-brita	Cimento	Emulsão	Água
1	20	79	-	1	3,6	3,3
2	40	59	-	1	3,5	2,8
3	52	-	47	1	4,0	4,3
4	40	-	59	1	4,3	4,3

Dimensionamento

A avaliação mecanicista da estrutura reciclada com emulsão, aqui denominada RECRap, seguiu a metodologia Sul-Africana conforme preconizado no *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials - A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials* (SABITA, 2020) para a camada estabilizada com emulsão (*Bitumen Stabilized material - BSM*) e no *South African Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014) para as demais camadas de pavimento.

O dimensionamento do BSM também necessitava de parâmetros do ensaio de compressão triaxial dos materiais que iriam compor a estrutura, dessa forma parte do material coletado nas sondagens também foram ensaiados para obtenção da coesão e do ângulo de atrito necessários ao modelo preconizado pelo manual Sul-africano (SABITA, 2020). Na

Tabela 3 podem ser verificados os principais resultados dos ensaios monotônicos triaxiais para os projetos de mistura desenvolvidos.

Tabela 3 – Resultados ensaios monotônicos triaxiais

Projeto	Coesão (c)	Coesão mantida (%)	Ângulo de atrito	Classificação TG2 (2009)
1	398	77	35,0	BSM1
2	294	62	40,6	BSM1
3	186	115	51,9	BSM2
4	206	100	47,9	BSM2

A avaliação das tensões e deformações foi conduzida utilizando o software de análise elástico linear AEMC, com o propósito de verificar as respostas do pavimento às cargas do tráfego. O tráfego foi calculado com base nas contagens classificatórias da concessionária, levando em conta os fatores de



DOI: 10.29327/1430212.49-110

APLICAÇÃO DE MATERIAL ESTABILIZADO COM EMULSÃO ASFÁLTICA (BSM) PARA RECUPERAÇÃO PROFUNDA DE PAVIMENTOS:
ESTUDO DE CASO DA BR-381/MG

equivalência de cargas definidos pelo SAPEM (2014), para determinar o Número N de repetições de carga do eixo padrão de 80 kN calculado com os Fatores de Equivalência da AASHTO conforme Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (DNIT, 2006). A caracterização das camadas do pavimento para essa análise mecânica considerou os resultados dos ensaios laboratoriais realizados nas misturas asfálticas recicladas, bem como as investigações geotécnicas conduzidas antes do início das obras de restauração. Para os quatro projetos de mistura reciclada foi realizado o ensaio triaxial dinâmico, para obtenção do módulo de resiliência, e o ensaio triaxial monotônico, para obtenção da coesão, da coesão mantida e do ângulo de atrito. Durante a execução da obra identificou-se que não haveria necessidade de execução do Projeto 4, portanto a estrutura dimensionada para o RECRap para os demais projetos pode ser verificada na Tabela 4.

Tabela 4 – Estruturas dimensionadas RECRap

Projeto	Camada	Sigla	Descrição	Espessura (cm)	Vida útil
Projeto 1	Rolamento	CAUQbor	CAUQ SPV 16mm com CAP modificado por Borracha	5,0	
	Base	BSM	Base Reciclada com Emulsão - Projeto 1	30,0	9 anos
	Sub-base	ARGverm	Argila Vermelha	20,0	(5,08E+07)
	CFT	Subleito	CBR≥6%	-	
Projeto 2	Rolamento	CAUQbor	CAUQ SPV 16mm com CAP modificado por Borracha	5,0	
	Base	BSM	Base Reciclada com Emulsão - Projeto 2	30,0	6 anos
	Sub-base	ARGverm	Argila Vermelha	20,0	(3,30E+07)
	CFT	Subleito	CBR≥6%	-	
Projeto 3	Rolamento	CAUQbor	CAUQ SPV 16mm com CAP modificado por Borracha	5,0	
	Base	BSM	Base Reciclada com Emulsão - Projeto 3	30,0	9 anos
	Sub-base	ARGverm	Argila Vermelha	20,0	(5,08E+07)
	CFT	Subleito	CBR≥6%	-	

Execução da obra

Nesta seção será apresentado o processo executivo realizado. Como primeira etapa, realizou-se a fresagem de 5 cm da camada de revestimento do pavimento asfáltico existente no segmento a ser reciclado, repetindo-se duas vezes por faixa devido ao limite de largura da fresadora (2 m) em comparação com a média de largura da faixa (3,8 m). A fresagem resultou em uma camada de Concreto Asfáltico Usinado a quente (CAUQ) remanescente, como esperado, devido à espessura média da camada de superfície do pavimento anterior, que era de 15 cm. Esse processo foi necessário para permitir a restauração do pavimento sem alterar o greide da rodovia. O material fresado foi transportado ao "bota-espera" localizado a 9 km de distância. Posteriormente, foi realizado o espalhamento de cimento Portland CPII-E seguido pelo uso da recicladora WR240 e de caminhões com emulsão asfáltica. Em seguida, ocorreu a compactação por rolos compactadores pé de carneiro, motoniveladora, rolo de pneu e rolo liso. Importante destacar que, tendo em vista a alta espessura da camada de BSM, o rolo pé de carneiro adotado foi da classe de 20 toneladas visando maior eficácia no processo de compactação, mitigando o surgimento de deformações após abertura ao tráfego.

Após a devida compactação da mistura reciclada, a camada reciclada permaneceu exposta sem receber a camada de revestimento por pelo menos quatro dias, permitindo a cura da camada para conferir maior rigidez inicial ao material antes da liberação ao tráfego. Em seguida, foi necessária uma fresagem fina na camada reciclada para garantir a irregularidade longitudinal (IRI) da rodovia no limite de 1,6 m/km preconizado pela especificação particular do grupo Arteris. A aplicação da camada de revestimento de 5 cm de CAUQ foi realizada por meio de uma vibro acabadora, após a



Raimi Costa da Silva, Thiago Gomes Galdino Leite,
Diogo Bento de Morais, Guilherme Rodrigues Linhares,
Zila Maria Garcia Mascarenhas, Kamilla Vasconcelos Savasini,
Celso Luiz dos Santo Romeiro Júnior, Mateus Wobeto

aplicação e ruptura da pintura de ligação com emulsão, feita por um caminhão espargidor com taxa de 1,0L/m². A compactação da camada de CAUQ foi realizada com o uso de rolo de pneu e rolo liso. A Figura 3 apresenta algumas etapas da restauração do pavimento com a técnica de reciclagem profunda a frio com emulsão asfáltica. Destaca-se ainda que em toda a extensão do trecho reciclado foram executados drenos longitudinais de pavimento, a fim de reduzir os riscos de infiltração de água na camada reciclada e garantir a durabilidade da solução.



Figura 3 - (a) Fresagem superficial do CAUQ; (b) Espalhamento do cimento; (c) Comboio Tanque Emulsão e Recicladora; (d) Aspecto trecho após a passagem da Recicladora; (e) Comboio Rolos Compactadores; (f) Aspecto final camada reciclada

Controle e Verificação de Qualidade

Devido à natureza única do serviço de reciclagem in situ com emulsão asfáltica, foi necessário adaptar os procedimentos convencionais de controle e verificação de qualidade. Essas adaptações foram essenciais para abordar a variabilidade dos materiais e das espessuras dos pavimentos, além de atender aos objetivos de sustentabilidade e eficiência do projeto.

- Controle Granulométrico e Velocidade de Avanço da Recicladora: O controle da qualidade começava com o ajuste do tambor fresador da recicladora e testes em diferentes velocidades de avanço. Amostras eram coletadas para verificar se a granulometria se aproximava da especificada no projeto. Este controle pré-executivo determinava a velocidade ideal de avanço, evitando a necessidade de verificações futuras para aceitação ou rejeição do material.
- Determinação e Controle da Taxa de Espalhamento de Cimento: Utilizando as amostras do controle granulométrico, coletadas antes da adição de emulsão asfáltica, era realizada a compactação em cilindro Proctor para determinar a máxima densidade para cada seção do pavimento. Essa informação era utilizada para definir a taxa de espalhamento de cimento por m² ideal para cada segmento, que era controlada rigorosamente medindo a massa de cimento distribuída sobre uma área conhecida.



[DOI: 10.29327/1430212.49-110](https://doi.org/10.29327/1430212.49-110)

**APLICAÇÃO DE MATERIAL ESTABILIZADO COM EMULSÃO ASFÁLTICA (BSM) PARA RECUPERAÇÃO PROFUNDA DE PAVIMENTOS:
ESTUDO DE CASO DA BR-381/MG**

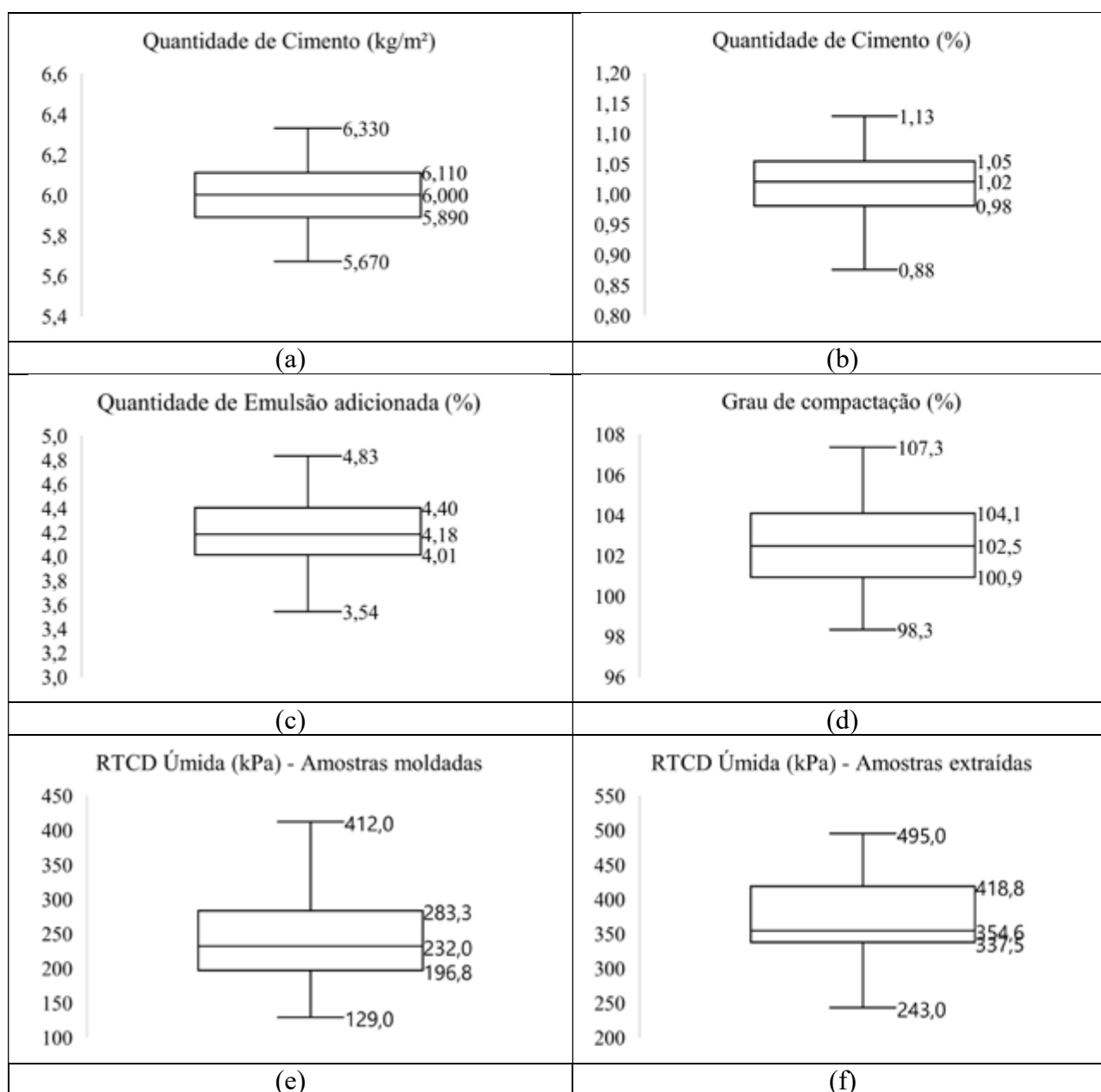
- **Controle da Aplicação de Emulsão Asfáltica:** Ao invés dos métodos convencionais que envolvem a extração de CAP, o controle da quantidade de emulsão asfáltica foi realizado pelo monitoramento do consumo real. Os caminhões de emulsão eram pesados antes e depois da aplicação, e a distribuição transversal da emulsão era verificada visualmente para garantir homogeneidade. O teor de ligante asfáltico residual permitido variava de -0,3% a +0,4% em relação ao valor definido em cada projeto de dosagem.
- **Controle de Compactação:** Imediatamente após a passagem da recicladora com adição e homogeneização da emulsão asfáltica, amostras eram coletadas para realizar curvas de compactação em cilindro Proctor e comparar com a densidade obtida in situ pelo método do frasco de areia. Os dados obtidos deveriam apresentar um grau de compactação igual ou superior a 97%, quando tratados estatisticamente, assegurando a adequada consolidação do material reciclado.
- **Controle de Resistência à Tração:** Inicialmente, o controle da resistência à tração foi realizado com amostras coletadas imediatamente após a passagem da recicladora. Estas amostras eram moldadas em cilindro Marshall e condicionadas em laboratório para promover a cura da emulsão. Para avaliar a resistência, um conjunto de corpos de prova era rompido na condição úmida e outro conjunto na condição seca, embora os critérios de aceitação da obra fossem baseados exclusivamente nos resultados obtidos na condição úmida. Neste caso, a resistência à tração por compressão diametral deveria ser no mínimo de 230 KPa. Devido a alguns resultados iniciais que não atendiam aos requisitos mínimos de resistência, com valores consideravelmente baixos, optou-se por realizar verificações adicionais nos casos discrepantes. A extração de amostras diretamente da pista foi adotada como uma medida de verificação, considerando que a condição real da pista é o indicador mais confiável. Como a camada de rolamento com Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) não era aplicada imediatamente após a reciclagem, houve tempo suficiente para a cura adequada da emulsão, resultando em todos os resultados subsequentes satisfazendo os critérios estabelecidos.
- **Controle de Espessura da camada reciclada:** A espessura da camada reciclada era controlada utilizando linha e trena. Durante essas verificações, também se avaliava a homogeneidade da aplicação da emulsão ao longo de toda a espessura da camada. O controle executado demonstrou que a recicladora utilizada possuía alta precisão neste quesito, e a avaliação da homogeneidade da emulsão foi satisfatória, não sendo a espessura da reciclagem nem a distribuição da emulsão fontes de preocupação.
- **Controle da Camada de rolamento executada com CBUQ:** O controle de qualidade da camada de rolamento executada com CBUQ seguiu os procedimentos convencionais. A avaliação do teor de CAP foi realizada a cada 100 toneladas de material produzido, por extração, com uma tolerância de variação de 0,2% em relação ao teor ótimo definido no projeto de dosagem. Adicionalmente, foi realizado o controle do volume de vazios na camada, que deveria estar entre 3% e 7%. Este rigor no controle assegurava que a camada de rolamento atendesse aos padrões de qualidade necessários para a durabilidade e o desempenho adequado do pavimento.
- **Controle de Irregularidade Longitudinal:** A irregularidade longitudinal da camada era avaliada com o uso de um perfilômetro a laser, garantindo que a superfície final atendesse ao critério de irregularidade máxima admissível de 1,6 m/km.
- **Controle Deflectométrico:** para fins de acompanhamento, o controle deflectométrico foi realizado a cada 10 metros. Contudo, não foi estabelecida uma exigência de valor devido à variabilidade identificada no trecho da obra.



Raimi Costa da Silva, Thiago Gomes Galdino Leite,
 Diogo Bento de Morais, Guilherme Rodrigues Linhares,
 Zila Maria Garcia Mascarenhas, Kamilla Vasconcelos Savasini,
 Celso Luiz dos Santo Romeiro Júnior, Mateus Wobeto

Na Tabela 5 são apresentados resumidamente os resultados das principais verificações de qualidade realizadas. Na figura 4 é apresentado um histograma do IRI medido a cada 10 m do Contorno de Betim antes da obra (abril/2023) e cinco meses após a conclusão da obra (março/2024). Na Tabela 6 os dados podem ser verificados de forma mais detalhada por faixa e por sentido.

Tabela 5 - Boxplots com os resultados obtidos nas verificações de qualidade: (a) quantidade de cimento espalhada na superfície, kg/m²; (b) quantidade de cimento total incorporada na camada de base, %; (c) quantidade de emulsão incorporada na base reciclada, %; (d) Grau de compactação aferido, %; (e) Resistência à tração por compressão diametral de amostras moldadas, kPa; (f) Resistência à tração por compressão diametral de amostras extraídas, kPa.





DOI: 10.29327/1430212.49-110

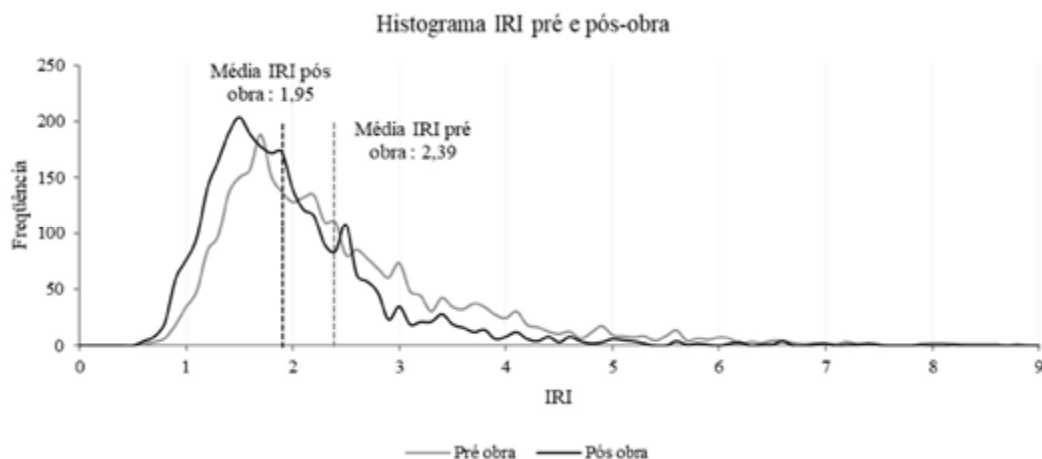
APLICAÇÃO DE MATERIAL ESTABILIZADO COM EMULSÃO ASFÁLTICA (BSM) PARA RECUPERAÇÃO PROFUNDA DE PAVIMENTOS:
ESTUDO DE CASO DA BR-381/MG

Figura 4 – Histograma do IRI do Contorno de Betim

Tabela 6 – Resumo dos dados de IRI pré e pós-obra por faixa e sentido

	SUL FAIXA 1		SUL FAIXA 2		NORTE FAIXA 1		NORTE FAIXA 2	
Total de kmf reciclado	0,6		5,3		0,3		5,6	
IRI	Pré obra	Pós obra	Pré obra	Pós obra	Pré obra	Pós obra	Pré obra	Pós obra
Média	2,10	1,80	2,80	1,89	2,00	1,99	2,67	2,10
Mediana	1,88	1,69	2,38	1,72	1,84	1,90	2,36	1,70
Desvio padrão	0,96	0,66	1,45	0,85	0,76	0,70	1,27	1,25
Mínimo	0,68	0,60	0,76	0,60	0,60	0,57	0,67	0,60
Máximo	11,00	6,02	10,35	7,15	7,29	4,93	8,53	9,98

Com base nos dados apresentados na Tabela 6, é notável uma redução significativa no Índice de Regularidade Internacional (IRI) nas faixas 2 de ambos os sentidos, resultando em uma diminuição média de 32% no sentido Sul e 21% no sentido Norte após a conclusão da obra. Essa melhoria é especialmente devida à concentração das obras nas faixas com tráfego mais intenso. Destaca-se ainda que a estratégia de realizar uma fresagem fina após a aplicação da BSM desempenhou um papel crucial na obtenção desses resultados. Nos dados pós-obra, notou-se ainda uma redução no desvio padrão, indicando uma maior uniformidade nos dados de IRI após as intervenções.

PRINCIPAIS DESAFIOS

Durante a execução da obra, enfrentaram-se uma série de desafios que exigiram soluções alternativas para garantir o sucesso do projeto. Um dos principais obstáculos foi lidar com a variedade de materiais encontrados na estrutura do pavimento, que incluíam BGTC (Brita Graduada Tratada com Cimento), BGS (Brita Graduada Simples) e Solo Brita. Apesar das sondagens prévias, a variabilidade de materiais ocorreu com mais frequência do que o esperado, assim como a variação de espessura da camada, que foi diferente das já mapeadas nas sondagens prévias. Tal fato exigiu uma abordagem cuidadosa durante o processo de reciclagem, visando garantir a qualidade e a durabilidade da nova camada de pavimento.

O entupimento dos bicos da recicladora também representou um grande desafio durante a execução da obra. Nos trechos de reciclagem, notaram-se afundamentos na camada de CAUQ, mesmo sem a liberação do tráfego. Ao verificar o local, foi evidente um excesso de emulsão em certos pontos e uma falta de homogeneidade em alguns segmentos (Figura 5a), apesar da taxa de aplicação da



Raimi Costa da Silva, Thiago Gomes Galdino Leite,
Diogo Bento de Moraes, Guilherme Rodrigues Linhares,
Zila Maria Garcia Mascarenhas, Kamilla Vasconcelos Savasini,
Celso Luiz dos Santo Romeiro Júnior, Mateus Wobeto

emulsão seguir os projetos de mistura. Após uma colaboração entre os envolvidos no projeto, identificou-se que a emulsão asfáltica, quando armazenada de um dia para o outro, formava uma "borra" que entupia os bicos da recicladora (Figura 6a). Para resolver esse problema, foi necessário criar um dispositivo de filtro específico (Figuras 6b e 6c) e realizar manutenção e limpeza constante dos equipamentos. Após a implementação do filtro, a emulsão foi distribuída de forma homogênea (Figura 5b).



Figura 5 - (a) trecho com a emulsão com aspecto heterogêneo; (b) Trecho com a emulsão com aspecto homogêneo

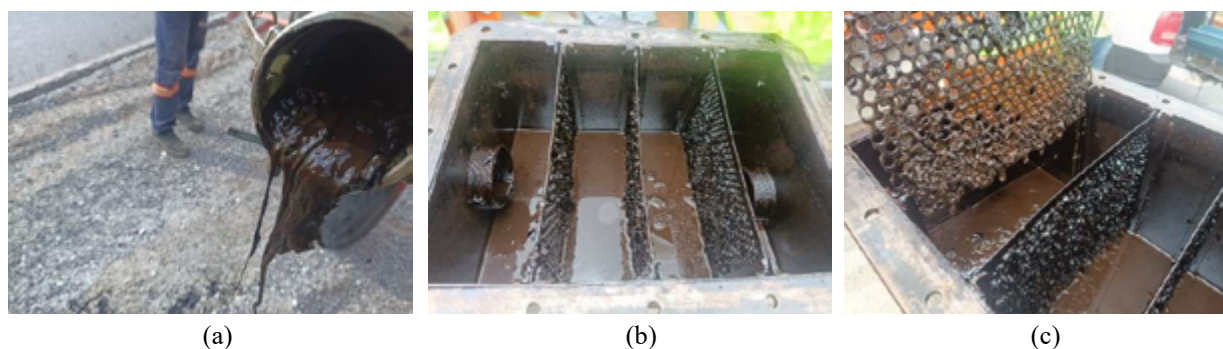


Figura 6 - (a) "borra" identificada na emulsão; (b) Filtro desenvolvido; (c) Detalhe do Filtro desenvolvido

Além disso, a calibração da taxa de emulsão e cimento foi um ponto crítico, pois um equilíbrio preciso entre esses materiais era essencial para garantir a estabilidade e resistência adequadas da nova estrutura. Por se tratar de um processo *in situ*, houve necessidade de ajustar a forma de espalhamento, onde foram realizados testes variando a velocidade do caminhão distribuidor de cimento e a abertura da caixa de distribuição, realizando as conferências da taxa de cimento até que fosse possível obter a taxa especificada no projeto.

Outro ponto importante foi a elevada rigidez da camada de BGTC existente, que dificultou sua reciclagem e reutilização. A recicladora teve a sua produtividade reduzida nesses locais, sendo necessária uma manutenção mais intensa para a troca dos bits que se desgastaram muito rapidamente, assim como um cuidado na taxa de aplicação da emulsão, visto que o avanço do equipamento era mais lento. Durante o processo foi necessário ajustar os parâmetros do processo de reciclagem, como a taxa de aplicação de emulsão e cimento, para garantir uma mistura adequada e homogênea.

A largura da faixa de trabalho da recicladora e a necessidade de fechar totalmente a pista também constituíram desafios logísticos consideráveis, demandando um planejamento minucioso e uma coordenação eficaz entre as equipes de trabalho da Concessionária, da empreiteira e das autoridades



DOI: 10.29327/1430212.49-110

APLICAÇÃO DE MATERIAL ESTABILIZADO COM EMULSÃO ASFÁLTICA (BSM) PARA RECUPERAÇÃO PROFUNDA DE PAVIMENTOS:
ESTUDO DE CASO DA BR-381/MG

rodoviárias. Essas medidas foram fundamentais para mitigar o impacto no tráfego e assegurar a segurança tanto dos trabalhadores quanto dos usuários da rodovia.

Por fim, ressalta-se que os aspectos relatados acima diminuíram a produção inicial da obra, porém após a superação das dificuldades iniciais e ajustes foi possível confirmar que a técnica é uma alternativa viável para reabilitação de pavimentos para as Concessionárias do Grupo Arteris, tanto pela capacidade de melhoria das condições estruturais quanto pela velocidade de execução da obra. Na Figura 7 é ilustrada a curva de aprendizado do trecho experimental, em que é possível identificar que após o domínio da técnica, cerca de 66% do volume de camada reciclada foi executado em apenas um mês de obra.

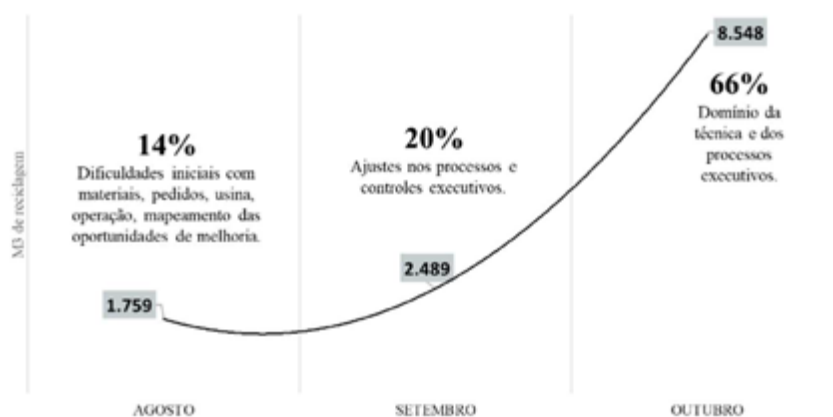


Figura 7 - Curva de aprendizado da obra

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de caso relatou o processo executivo de reciclagem in situ com emulsão asfáltica na rodovia BR-381/MG – Contorno de Betim e ofereceu uma visão abrangente sobre os aspectos operacionais, técnicos e logísticos envolvidos nessa técnica de reabilitação de pavimentos. Ao longo do estudo, foram identificados e superados diversos desafios, desde a heterogeneidade da estrutura existente até questões relacionadas ao controle de distribuição dos materiais. Destaca-se a importância de considerar a reciclagem in situ com emulsão asfáltica como uma alternativa viável e vantajosa para a reabilitação de pavimentos, não apenas em termos de sustentabilidade ambiental, mas também em termos de eficiência operacional e econômica. Espera-se que as lições aprendidas ao longo deste processo possam orientar futuros projetos de reabilitação, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias cada vez mais eficazes e sustentáveis na gestão da infraestrutura rodoviária.

AGRADECIMENTOS

À Greca Asfaltos pelo fornecimento da emulsão asfáltica, desenvolvimento do Projeto de Mistura e apoio técnico prestado durante o Projeto.

À Neovia Engenharia, responsável pela execução da obra.

À Ingevity pelo apoio técnico prestado durante o Projeto.



Raimi Costa da Silva, Thiago Gomes Galdino Leite,
Diogo Bento de Morais, Guilherme Rodrigues Linhares,
Zila Maria Garcia Mascarenhas, Kamilla Vasconcelos Savasini,
Celso Luiz dos Santo Romeiro Júnior, Mateus Wobeto

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent FDR201A. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – Manual de restauração de pavimentos asfálticos, publicação IPR-720, segunda edição, IPR, Rio de Janeiro, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – Manual de estudos de tráfego, publicação IPR-723, IPR, Rio de Janeiro, 2006.

SOUTHERN AFRICAN BITUMEN ASSOCIATION (SABITA). *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials - A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials*. TG2. Third Edition. 2020. ISBN 978-1-874968-77-1

WIRTGEN GROUP. *Wirtgen Cold Recycling Technology*. First Edition. 2012.



AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO DOSADAS COM 100% DE RAP E EMULSÕES ASFÁLTICAS CONVECIONAL E MODIFICADA

*Vitor Andrade Farias¹; Mario Sergio de Souza Almeida¹; Vitor Calmon Almeida¹;
Paulo Ricardo Lemos de Santana²; Elane Donato Santos² & Weiner Gustavo Silva Costa¹*

RESUMO

A fresagem de pavimentos asfálticos desempenha um papel crucial na manutenção e reabilitação de rodovias, removendo a camada superficial desgastada de asfalto. O processo de fresagem do revestimento asfáltico envelhecido gera o RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), resíduo de grande potencial para ser reciclado. Este material está se tornando cada vez mais utilizado na Engenharia Rodoviária, sendo uma opção promissora para que se tenha obras viárias cada vez mais econômicas e sustentáveis. Dessa forma, o presente estudo produziu misturas asfálticas a frio recicladas, utilizando 100% de RAP, testadas com diferentes teores de emulsão convencional (RL-1C) e modificada por polímero elastomérico (RC-1C-E), com o objetivo de avaliar a influência de cada um destes ligantes no comportamento na resistência, deformabilidade e volumetria das misturas. As misturas foram produzidas de acordo com as prescrições exigidas através do método de dosagem Marshall, para uma energia de compactação de 50 golpes para cada face do corpo de prova, e posteriormente ensaiadas para determinação da estabilidade, fluência e volumetria para cada teor de ligante que foi avaliado neste estudo. Os resultados obtidos indicaram que o ligante modificado por polímero elastomérico permitiu a redução do teor de projeto, sem prejuízo da mistura asfáltica em termos de comportamento mecânico.

PALAVRAS-CHAVE: Fresagem; PMF reciclado; Dosagem Marshall; Comportamento mecânico.

ABSTRACT

Milling asphalt pavements plays a crucial role in the maintenance and rehabilitation of roads and highways, removing the worn-out surface layer of asphalt. The milling process of aged asphalt coating generates RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), a residue with great potential for recycling. This material is becoming increasingly used in Road Engineering, being a promising option for making road works more economical and sustainable. Thus, the present study produced recycled cold asphalt mixtures using 100% RAP, tested with different contents of conventional emulsion (RL-1C) and polymer-modified elastomeric emulsion (RC-1C-E), with the aim of evaluating the influence of each of these binders on the resistance, deformability, and volumetrics of the mixtures. The mixtures were produced according to prescribed specifications using the Marshall mix design method, for a compaction energy of 50 blows for each face of the specimen, and subsequently tested to determine stability, flow, and volumetrics for each binder content evaluated in this study. The results obtained indicated that the polymer-modified elastomeric binder allowed for a reduction in the design content without compromising the asphalt mixture in terms of mechanical behavior.

KEY WORDS: Milling; Recycled Cold Mix Asphalt; Marshall mix design; Mechanical behavior.

¹ Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Av. Rui Barbosa, 710, 44380-000, Cruz das Almas, Bahia, Brasil, vitorandrade@aluno.ufrb.edu.br; mario.almeida@ufrb.edu.br; vitorcalmon@aluno.ufrb.edu.br; weiner@ufrb.edu.br.

² Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Av. Transnordestina, s/n, Novo Horizonte, 44036-900, Feira de Santana, Bahia, Brasil, ricardolemos@aluno.ufrb.edu.br; elanedonato@aluno.ufrb.edu.br.



INTRODUÇÃO

Os meios de transportes são fundamentais no desenvolvimento econômico, cultural e social da humanidade desde as primeiras civilizações. Segundo Pereira (2011), no início do século XXI, o Brasil começou a importar carros dos Estados Unidos, o que auxiliou na ocupação de áreas remotas. Entretanto, esses veículos não podiam alcançar todos os lugares levando à necessidade de se construir estradas, impulsionando assim o transporte rodoviário nacional e criando oportunidades econômicas.

O Brasil possui uma frota de veículos que passou de 31.913.003 em 2001 para 118.827.435 unidades em 2023 (CNT, 2023). Esse volume de automóveis em circulação no território implica diretamente no uso de rodovias e, conseqüentemente, no desgaste e eventual colapso das mesmas, sendo necessárias intervenções para manutenções cada vez mais breves, a fim de manter as estradas em condições seguras para o tráfego.

Nas rodovias pavimentadas brasileiras, que representam 12,3% do total (CNT, 2023), o tipo de pavimento predominante é o pavimento asfáltico, que possui custos elevados para implementação. Segundo Bernucci *et al.* (2008) a mistura asfáltica usinada mais empregada no país é o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Para execução desse tipo de obra de infraestrutura é comumente necessário o uso de agregados virgens (britas e finos), cimento asfáltico de petróleo (CAP) para CBUQ, ou emulsão asfáltica de petróleo (EAP) para pré-misturados a frio (PMF). Ademais disso, deve-se levar em conta os custos de energia para transporte dos materiais e produção das misturas asfálticas.

Segundo Moosom (2022), o rápido esgotamento, o declínio da qualidade das fontes de agregados e o aumento do preço do asfalto, motivaram a indústria da construção a procurar por soluções alternativas para reduzir os custos de produção e racionalização dos materiais. Dessa forma, a mistura asfáltica envelhecida, obtida no processo de fresagem de pavimentos deteriorados, nomeada de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), surge como um substituto eficiente dos agregados virgens em novas misturas asfálticas, reduzindo a exploração de jazidas de matéria prima não renovável e o uso de ligante asfáltico nas misturas (MILAD, 2020).

De acordo com Castro Neto (2000), uma das primeiras experiências com o uso de material fresado no Brasil ocorreu em 1986, na rodovia Anhanguera, onde uma mistura contendo 50% de RAP foi aplicada no revestimento da camada de rolamento. Mesmo após 14 anos de uso, a rodovia ainda apresentava excelentes condições. Desde então, há poucos registros documentados sobre a incorporação de RAP em misturas asfálticas no país. Conforme Suzuki (2019), a falta de regulamentações rigorosas e a ausência de diretrizes técnicas apropriadas para o uso eficaz e controle tecnológico de projetos com asfalto reciclado (RAP) são fatores cruciais que desencorajam sua aplicação em obras rodoviárias.

Unger Filho *et al.* (2020) examinaram a viabilidade de aplicar uma mistura asfáltica reciclada a frio, utilizando 100% de RAP e um agente emulsificado reciclador de asfalto, como uma nova camada de base de pavimento. Testes laboratoriais foram conduzidos para avaliar a rigidez e a resistência da mistura reciclada, através de ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração indireta. Esses testes foram realizados para investigar o impacto do tempo de armazenamento (7, 14 e 28 dias) entre a preparação da mistura e sua compactação. Os resultados indicaram que, para períodos curtos de cura, o tempo de armazenamento contribuiu para melhorar as propriedades mecânicas das misturas recicladas a frio.



DOI: [10.29327/1430212.49-52](https://doi.org/10.29327/1430212.49-52)

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO DOSADAS COM 100% DE RAP E EMULSÕES ASFÁLTICAS CONVENCIONAL E MODIFICADA

Ferreira Filho (2018), realizou o estudo de misturas betuminosas a frio com emulsão de ruptura lenta (RL-1C), onde foram dosadas e compactadas misturas com 100% de RAP e outras com 100% de agregados virgens, em diferentes teores de emulsão. Com os resultados de estabilidade, fluência, volume de vazios e densidade, foi estabelecido o teor de projeto de 5,4% de ligante para as misturas com agregado virgem, já nas misturas com a incorporação de RAP este teor foi de 3,4% indicando a redução significativa de emulsão asfáltica entre as misturas.

Machado (2018) analisou o comportamento mecânico de PMF densos com emulsão asfáltica convencional e modificada por polímero. O teor de projeto definido após os ensaios iniciais foi de 7,0% para as misturas com emulsão asfáltica convencional e 6,5% para as misturas com emulsão asfáltica modificada por polímero. De posse dos resultados, foi possível observar o desempenho superior da emulsão modificada, com um aumento de 32,3% da estabilidade, 6,1% de resistência a tração e redução de 9,4% da fluência.

Uma característica relevante das misturas a frio é a influência do tempo nas suas propriedades mecânicas. Pedreira (2021) desenvolveu o estudo com a finalidade de avaliar o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica fabricada em uma usina de pequeno porte compactadas após 1, 7, 15, 30 e 60 dias de produzidas. Com isso, foi possível constatar que o PMF apresenta uma perda de umidade ao longo do tempo de estocagem, o que resulta em uma redução da estabilidade, fluência e resistência a tração e aumento do volume de vazios. Para o traço foi utilizado o teor de 4,8% de CAP residual, correspondendo a 8% de emulsão asfáltica, que apresentou uma queda de 319 kgf (1 dia) para 89 kgf (60 dias) para a energia de compactação de 50 golpes. Já o volume de vazios apresentou um aumento de 7,1 pontos percentuais entre a idade mínima e máxima de estocagem analisada.

Diante ao exposto, o objetivo deste estudo foi desenvolver misturas asfálticas recicladas a frio, empregando 100% de material fresado com emulsão asfáltica convencional (RL-1C) e emulsão asfáltica modificada por polímero elastomérico (RC-1C-E). Com os resultados obtidos, almeja-se conduzir uma análise preliminar sobre o desempenho mecânico e volumétrico dessas diferentes composições, com o intuito de examinar o impacto das duas emulsões asfálticas nas propriedades da mistura reciclada a frio.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes realizados no presente trabalho envolveram a análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas a frio, utilizando 100% de material fresado (RAP) como agregado em sua composição, para diferentes emulsões asfálticas. O RAP utilizado é oriundo do reparo do pavimento de um trecho da BR 101/BA, que após fresado, parte foi depositada no Laboratório de Pavimentação localizado no pavilhão de engenharias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB).

Caracterização do Agregado (RAP)

As amostras de RAP coletadas foram passadas pela peneira de 19 mm (3/4") para descartar a parcela da amostra de graduação superior e garantir o diâmetro máximo do material, para a realização dos ensaios. As amostras foram dispostas sobre uma lona plástica para secagem ao ar, alcançando assim sua umidade higroscópica. Após a secagem, uma parte do material foi separada e



Vitor Andrade Farias, Mario Sergio de Souza Almeida,
Vitor Calmon Almeida, Paulo Ricardo Lemos de Santana,
Elane Donato Santos & Weiner Gustavo Silva Costa

quarteada utilizando o separador mecânico (HELNOR) para agregados graúdos, Figura 1, conforme o método descrito no PRO DNER 199 (DNER, 1996).

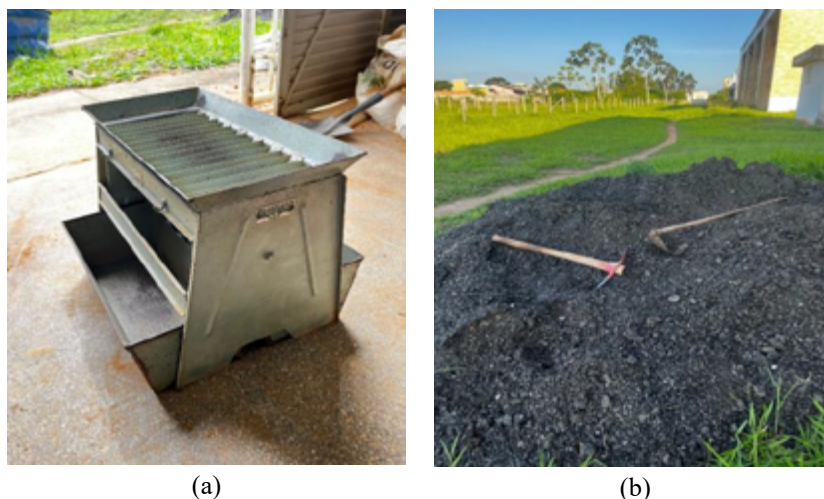


Figura 1. (a) Separador mecânico; (b) Coleta do RAP.

A caracterização do RAP iniciou com a análise de sua granulometria em triplicata, em conformidade com as especificações do ME DNIT 412 (DNIT, 2019), resultados apresentados na Tabela 1. Em seguida, para determinar a densidade, massa específica e absorção, as amostras foram ensaiadas de acordo com o normativo ME DNIT 413 (DNIT, 2021), conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 1. Granulometria do RAP (BR 101/BA).

Peneiras		RAP
Abertura (pol.)	Abertura (mm)	Passante (%)
1"	25,0	100,00
3/4"	19,0	100,00
1/2"	12,5	87,93
3/8"	9,5	71,78
nº 4	4,75	39,56
nº 10	2,0	18,28
nº 200	0,075	0,43

Tabela 2. Densidade e absorção do RAP (BR 101/BA).

Ensaio	Resultados
Densidade Relativa Real	2,541
Densidade Relativa Aparente	2,428
Massa Específica Real (g/cm ³)	2,534
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,421
Absorção (%)	1,84

Por se tratar de um material reciclado, que já incorpora ligante asfáltico, foram realizados os ensaios de extração do CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) envelhecido para identificar o teor de ligante existente no RAP, Tabela 3, e comparar as curvas granulométricas antes e após a extração.



DOI: 10.29327/1430212.49-52

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO DOSADAS COM 100% DE RAP E EMULSÕES ASFÁLTICAS CONVECIONAL E MODIFICADA

O procedimento para realização do ensaio seguiu dois métodos, sendo eles: extração de ligante via extrator Soxhlet ME e via método do Rotarex, conforme as normas DNIT 158 (DNIT, 2011) e ME DNER 053 (DNER, 1994), respectivamente, como apresentado na Figura 2.

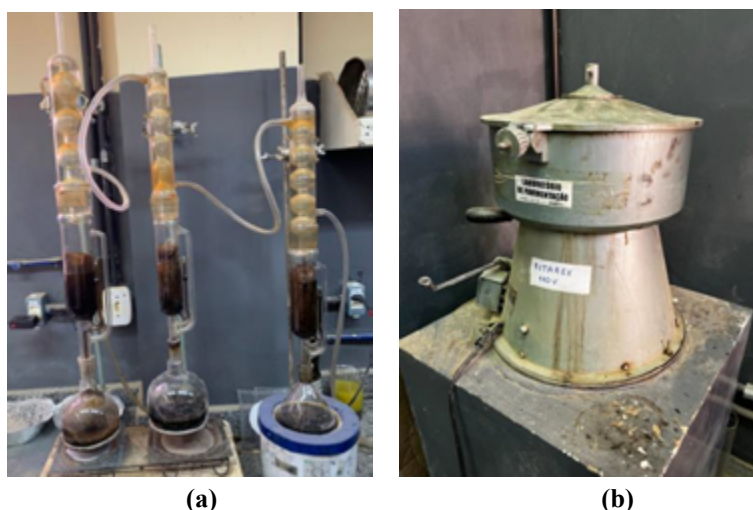


Figura 2. Processos de extração do CAP residual (a) Extrator Soxhlet; (b) Extrator Rotarex.

Tabela 3. Ensaio de extração de ligante residual do RAP.

Ensaio	Teor Residual
Rotarex (DNER 053/94)	5,09%
Soxhlet (DNIT 158/2011)	5,41%

Especificação das Emulsões ASFálticas

Para produção das misturas asfálticas deste estudo, foram empregadas a emulsão asfáltica catiônica convencional de ruptura lenta (RL-1C) e a emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada modificada por polímero elastomérico (RC-1C-E). Ambas fornecidas pela Brasquímica – Produtos Asfálticos LTDA, e os certificados de análise correspondentes estão disponíveis nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Caracterização da emulsão asfáltica RL-1C pela empresa Brasquímica (BRASQUIMICA, 2024).

Propriedades	Resultados	Limite	Ensaio
Viscosidade Saybolt Furol, s, 25°C.	21	Máx. 90	NBR-14491
Sedimentação após 5 dias, % massa.	2,0	Máx. 5,0	NBR-6570
Peneiração 0,84 mm, % massa.	0,01	Máx. 0,1	NBR-14393
Resistência à água (cobertura), %.	96	Mín. 80	NBR-14249
Carga de partícula.	Positiva	Positiva	NBR-6567
PH.	2,8	Máx. 6,5	NBR-6299
Resíduo Asfáltico, % em massa.	60,95	Mín. 60,0	NBR-14376
Penetração, 25°C, 100g, 5s, 0.1 mm.	51,5	40 – 150	NBR-6576
Teor de betume, %.	99,8	Mín. 97	NBR-14855
Ductilidade, 25°C, cm.	70,0	Mín. 40	NBR-6293



Vitor Andrade Farias, Mario Sergio de Souza Almeida,
Vitor Calmon Almeida, Paulo Ricardo Lemos de Santana,
Elane Donato Santos & Weiner Gustavo Silva Costa

Tabela 5. Caracterização da emulsão asfáltica RC-1C-E pela empresa Brasquímica (BRASQUIMICA, 2024).

Propriedades	Resultados	Límite	Ensaio
Viscosidade Saybolt Furol, s, 25°C.	28,6	Máx. 70	NBR-14491
Sedimentação após 5 dias, % massa.	2,0	Máx. 5,0	NBR-6570
Peneiração 0,84 mm, % massa.	0,01	Máx. 0,1	NBR-14393
Resistência à água, %, seco.	97	Mín. 80	NBR-6300
Resistência à água, %, úmido.	95	Mín. 60	NBR-6567
Carga de partícula.	Positiva	Positiva	NBR-6567
PH.	3,3	Máx. 6,5	NBR-6299
Resíduo Asfáltico, % em massa	64,0	Mín. 62,0	NBR-14376
Penetração, 25°C, 100g, 5s, 0.1 mm.	63,3	45 - 150	NBR-6576
Ponto de amolecimento	56,0	Mín. 55	NBR-6560
Viscosidade Brookfield, 135°C	894,5	Mín. 600 CP	NBR-15184
Recuperação Elástica a 25° C	72,0	Mín. 70	NBR-15086

Mistura para o Teor de Projeto

Para determinar o traço de projeto da mistura, foram utilizados os parâmetros para PMF (Pré-misturado a frio) da especificação técnica ET-DE-P00/025 (DER/SP, 2006). No entanto, devido a granulometria do RAP não se enquadrar em nenhuma das faixas especificadas no normativo, os estudos seguiram com a granulometria natural do material, apresentado na Tabela 6. As curvas do RAP com e sem ligante, juntamente com os limites da faixa são apresentadas na Figura 3.

Tabela 6. Granulometria do RAP e faixas granulométricas da Especificação Técnica (DER/SP, 2006).

Peneiras	RAP		Faixas Granulométricas – ET-DE-P00/025 – DER/SP (2006)							Tolerância
	Com ligante	Sem ligante	I	II	III	IV	V	VI	VII	
Abertura (pol.)	Passante (%)	Passante (%)								
1"	100,00	100,00	75-100	100	-	95-100	100	-	-	±7
3/4"	100,00	100,00	50-80	75-100	100	70-90	95-100	100	100	±7
1/2"	87,93	95,52	-	-	75-100	-	-	95-100	85-100	±7
3/8"	71,78	84,73	25-50	30-60	35-70	35-60	35-60	45-80	70-90	±7
n° 4	39,56	64,66	5-20	10-35	20-40	18-35	18-35	25-45	30-60	±5
n° 10	18,28	44,24	0-10	5-20	10-20	10-20	10-20	15-20	20-45	±5
n° 200	0,43	8,69	0-2	0-2	0-2	0-5	0-5	0-5	2-6	±2



DOI: 10.29327/1430212.49-52

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO DOSADAS COM 100% DE RAP E EMULSÕES ASFÁLTICAS CONVECCIONAL E MODIFICADA

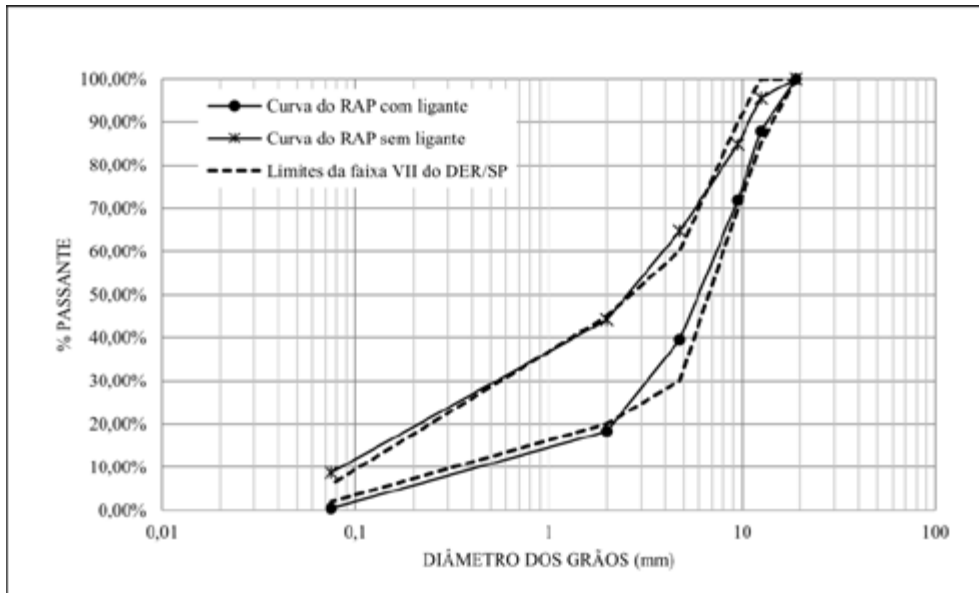


Figura 3. Composição granulométrica do RAP com e sem ligante.

Os teores de ligante utilizados nas misturas foram baseados no teor ótimo de 3,0%, obtido a partir do estudo do comportamento mecânico de misturas recicladas a frio dosadas com 100% de RAP e emulsão modificada por polímero RC-1C-E (Almeida, 2023). Portanto, inicialmente foram conduzidas as misturas com teores de 2,0%, 2,5%, 3,0%, 3,5% e 4,0% de CAP residual das emulsões RL-1C e RC-1C-E. Porém, devido a análise dos parâmetros obtidos com o resultado dos ensaios da mistura RL-1C foram realizadas novas misturas a fim de identificar uma tendência no comportamento dos diferentes teores de emulsão (4,5%, 5,0% e 5,5%).

Seguindo o procedimento do ensaio Marshall para misturas betuminosas a frio com emulsão asfáltica, descrito no DNER – ME 107 (DNER, 1994), foram produzidos corpos de prova (CP) com massa de 1200 g e compactados em um molde metálico cilíndrico com a energia de 50 golpes por face, usando o compactador automático da marca HELVAN, para caracterização mecânica através dos ensaios de Estabilidade e Fluência (DNER 107/94). Além disso, foram dosadas mais duas misturas asfálticas para cada teor e emulsão avaliada, com massa de 2000 g cada, para determinação da densidade máxima medida (G_{mm}) através do Rice Test ME DNIT 427 (DNIT, 2020), conforme indicado no fluxograma da Figura 4.

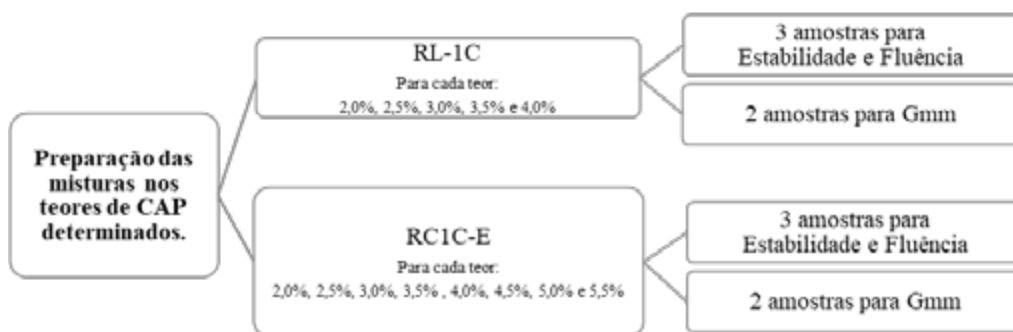


Figura 4. Fluxograma: Preparação das misturas asfálticas por teor de emulsão para ensaios mecânicos.



Vitor Andrade Farias, Mario Sergio de Souza Almeida,
Vitor Calmon Almeida, Paulo Ricardo Lemos de Santana,
Elane Donato Santos & Weiner Gustavo Silva Costa

As amostras compactadas, após cura de 24 h em estufa a 60°C, foram deixadas à temperatura ambiente (25°C) por pelo menos 2 horas, para serem extraídas dos moldes. Após a extração, elas foram pesadas ao ar e suas medidas de diâmetro e altura foram coletadas em quatro posições diametralmente opostas, conforme especificado no ME DNIT 428 (DNIT, 2022). Este procedimento permitiu a determinação do volume de vazios (V_v) e da densidade aparente das amostras compactadas (G_{mb}), usando os resultados prévios de G_{mm} para as misturas.

Por fim, as amostras foram então colocadas em uma estufa a 40°C por 2 horas para realizar o ensaio de estabilidade e fluência, conforme descrito no método DNER – ME 107 (DNER, 1994). Esse ensaio foi conduzido utilizando uma prensa automática (HELVAN) com capacidade de carga de 4.000 kg, Figura 5, e velocidade de elevação de 50 mm/min, em conformidade com as especificações da norma. Os resultados desses ensaios foram parâmetros cruciais para determinar o teor de projeto a ser adotado.



Figura 5. (a) Prensa automática; (b) Amostras compactadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para determinação do teor de projeto para as emulsões avaliadas foram utilizados os parâmetros mecânicos e volumétricos da ET-DE-P00/025 (DER/SP, 2006) de modo que os resultados obtidos para a mistura atendam aos requisitos de projeto, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7. Requisitos de projeto da Especificação Técnica (DER/SP, 2006).

Características	Parâmetros (PMF Denso)
Estabilidade mínima, kN	3,5 (75 golpes)
	2,0 (50 golpes)
Fluência (mm)	2,0 – 4,5
% de vazios totais	< 10

Após realizado os procedimentos normativos com as misturas asfálticas dosadas com 100% de RAP e emulsão RC-1C-E, foi possível interpretar o comportamento mecânico através dos resultados apresentados graficamente na Figura 6, que mostra os teores testes de CAP residual da emulsão e valores médios com desvio padrão de: Estabilidade, Fluência, Densidade Aparente (G_{mb}) e Volume de Vazios (V_v).



DOI: 10.29327/1430212.49-52

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO DOSADAS COM 100% DE RAP E EMULSÕES ASFÁLTICAS CONVECCIONAL E MODIFICADA

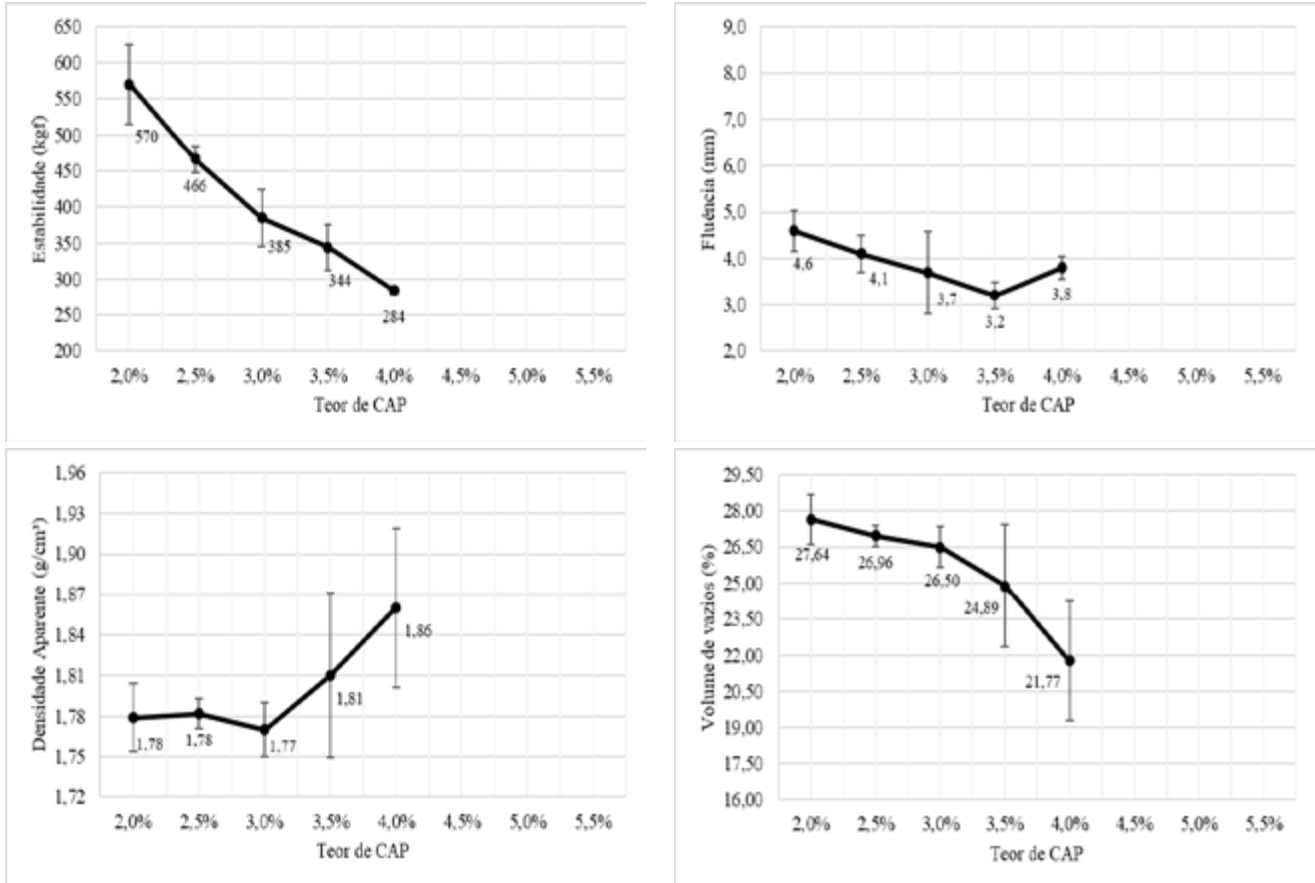
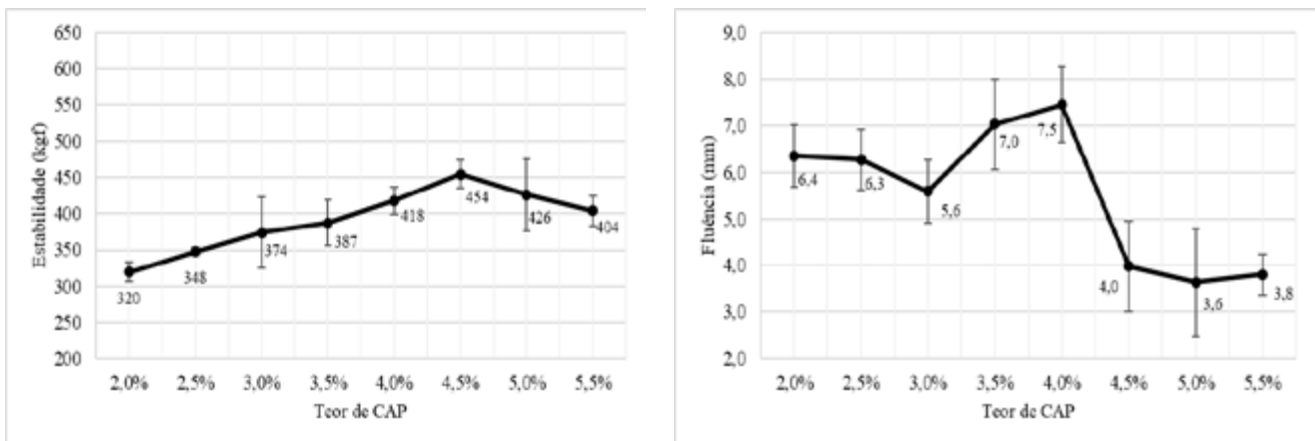


Figura 6. Parâmetros mecânicos e volumétricos das amostras compactadas de misturas com RC-1C-E.

De forma semelhante, os resultados referentes à emulsão convencional (RL-1C) estão registrados na Figura 7. Entretanto, observa-se que estes incluem teores adicionais de 4,5%, 5,0% e 5,5% de CAP residual, ao contrário da emulsão modificada. Isso se deve à necessidade de expandir a faixa de teores testados, devido ao aumento constante dos valores de Estabilidade e Densidade Aparente (G_{mb}) dos teores de 2,0% a 4,0%.





Vitor Andrade Farias, Mario Sergio de Souza Almeida,
Vitor Calmon Almeida, Paulo Ricardo Lemos de Santana,
Elane Donato Santos & Weiner Gustavo Silva Costa

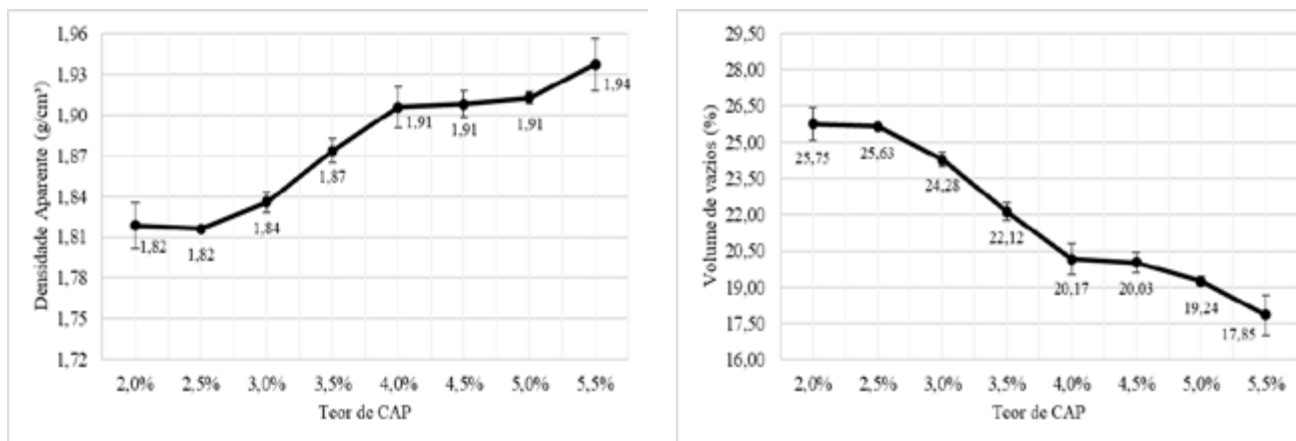


Figura 7. Parâmetros mecânicos e volumétricos das amostras compactadas de misturas com RL-1C.

Segundo Santana (2009), os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas são de fundamental importância, sendo a densidade aparente um fator determinante que influencia diretamente nessas propriedades como o volume de vazios, além auxiliar na definição do teor de asfalto efetivo da mistura.

Analisando o volume de vazios apresentado nas misturas é possível notar que elas não estão em conformidade com a ET-DE-P00/025 (DER/SP, 2006). Contudo, a especificação técnica não distingue o parâmetro para as duas possíveis energias de compactação (50 e 75 golpes por face), como feito para a estabilidade que possui valor mínimo para cada energia aplicada. Por outro lado, a norma de especificação de serviço ES DNIT 153 (DNIT, 2010) traz valores de volumes de vazios para PMF que podem variar de 5% a 30%, sendo assim, as amostras poderiam se enquadrar neste normativo.

Verificando os resultados das misturas com emulsão RC-1C-E, é possível observar que apesar de apresentar maior estabilidade, o teor de 2,0% não atendeu a fluência segundo a Especificação Técnica. Enquanto que o teor de 3,5% apresentou menores deformações com valor de fluência mais próximo da média da faixa determinada (2,0 – 4,5 mm), densidade aparente relativamente alta, apesar do desvio padrão elevado, assim como o teor de 4,0%. Sendo assim, por questões de custo, o teor definido para projeto foi o de 3,5%. Os teores de 2,5% e 3,0% apresentaram estabilidades maiores que o teor de projeto, porém, caracterizou misturas menos densas e maiores deformações com fluências próximas ao limite superior (4,5 mm).

Observando os valores médios para a emulsão RL-1C, constatou-se que todos os teores apresentaram estabilidade superior ao parâmetro da ET (200 kgf – 50 golpes). Contudo, apenas os teores de 4,5%, 5,0% e 5,5% tiveram fluência entre a faixa exigida (2,0 – 4,5 mm), além das maiores estabilidades. Dessa forma, o teor definido para projeto foi o de 4,5%, teor que apontou densidade aparente e o volume de vazios consistente e com poucas variações em relação aos teores próximos e a maior estabilidade entre as misturas.

CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos nota-se que a emulsão modificada por polímero elastomérico (RC-1C-E) apresentou melhor comportamento mecânico e volumétrico, quando comparada a emulsão



DOI: [10.29327/1430212.49-52](https://doi.org/10.29327/1430212.49-52)

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO DOSADAS COM 100% DE RAP E EMULSÕES ASFÁLTICAS CONVECCIONAL E MODIFICADA

convencional de ruptura lenta (RL-1C), indicando uma melhor eficiência deste tipo de emulsão para misturas asfálticas recicladas a frio.

A definição dos teores de projeto para cada emulsão, permitiu observar a redução do teor de CAP residual entre as misturas, para que se alcançasse resultados equivalentes e que satisfizessem aos requisitos de projeto da norma adotada (DER/SP, 2006). Essa redução refletirá em uma diminuição de custo de produção, além de minimizar o uso dos recursos naturais, tornando a atividade mais sustentável.

Entretanto, para que se possa fazer uma avaliação mais precisa é crucial o desenvolvimento de outros estudos, com resíduos de diferentes origens e idades, incluindo a realização de ensaios dinâmicos de módulo de resiliência e fadiga, de modo que se possa estimar de maneira mais realista o desempenho destas misturas recicladas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. R. X. ; ALMEIDA, M. S. S. ; COSTA, W. G. S. ; SANTOS, E. D. ; SANTANA, P. R. L. . Influência da cal na resistência à tração de mistura asfáltica a frio reciclada utilizando 100% de rap. In: 37º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, 2023, Santos. Anais do 37º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, 2023.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: 2a edição. 2022. 759 p.
- BRASQUIMICA LTDA. Especificação Técnica- Emulsão RL-1C e RC-1C-E. Bahia, 2024.
- CASTRO NETO, A.M. Proposta de projeto de dosagem de concreto betuminoso reciclado a quente. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica / USP – Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo – SP, 2000.
- Confederação Nacional do Transporte – CNT. Pesquisa CNT de Rodovias 2023: Painel Rodoviário. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/painel-cnt-transporte-rodoviario>. Acesso em: abril de 2024.
- Departamento de Estradas de Rodagem (DER/SP). ET-DE-P00/025. Pré-misturado a frio – Especificação técnica. São Paulo, 2006.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 053. Misturas Betuminosas- Percentagem de Betume, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1994.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 107. Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica-Ensaio Marshall, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1994.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 199. Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1996.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 153. Pavimentação asfáltica – Pré misturado a frio com emulsão catiônica convencional – Especificação de serviço, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2010.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 158. Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio, Brasília, DF, Brasil. 2011.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 412. Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – ME, Brasília, DF, Brasil. 2019.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 413. Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio, Brasília, DF, Brasil. 2021.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 427. Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio, Brasília, DF, Brasil. 2020.



Vitor Andrade Farias, Mario Sergio de Souza Almeida,
Vitor Calmon Almeida, Paulo Ricardo Lemos de Santana,
Elane Donato Santos & Weiner Gustavo Silva Costa

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 428. Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio, Brasília, DF, Brasil. 2022.

FERREIRA FILHO, E. C. Estudo de misturas asfálticas a frio com uso de revestimento asfáltico fresado. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão. São Luís, 2018.

FILHO, W. U.; KLINSKY, L. M. G.; MOTTA, R.; BERNUCCI, L. L. B. Cold recycled asphalt mixture using 100% RAP with emulsified asphalt-recycling agent as a new pavement base course. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2020, p. 1-11, 2020.

MACHADO, M. C. Comportamento mecânico de pré-misturados a frio densos com emulsões asfálticas convencional e modificada por polímero com e sem geossintético. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, 2018.

MILAD, A.; TAIB, A. M.; AHMEDA, A. G. F.; SOLLA, M.; YUSOFF, N. I. M. A review of the use of reclaimed asphalt pavement for road paving applications. *J. Teknol*, v. 82, n. 3, p. 35-44, Malaysia, 2020.

MOOSOM, J. J.; GOH, T. S.; KONG, S. Y. Use of asphalt milling material in construction of the roadway. In: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2022. p. 01014.

PEDREIRA, W. J. P.; ALMEIDA, M. S. S., CARVALHO, A. I. S.; SILVA, F. G. S. Efeito do tempo de estocagem no comportamento mecânico de mistura asfáltica a frio produzida em usina de pequeno porte. *Revista Matéria*. Volume 26, nº 4. Rio de Janeiro, 2021.

PEREIRA, L. A. G.; LESSA, S. N. O processo de planejamento e desenvolvimento do transporte rodoviário no Brasil. *Caminhos de Geografia*, v. 12, n. 40, p. 26-45, Uberlândia, 2011.

SUZUKI, K. Y. Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.



PROPOSTA DE ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO *IN SITU* COM EMULSÃO ASFÁLTICA: Estudo de caso em uma via urbana de Curitiba/PR

Douglas Antônio Thiel¹; Matheus David Inocente Domingos²; Allan Monteiro Silva¹; Yan Gorski de Campos Malta³; Rafael Marçal Martins de Reis¹; Joel Silveira³.

RESUMO

A condição ruim do estado de conservação de grande parte das rodovias brasileiras promove a busca por técnicas de recuperação de pavimentos, aliado a reutilização do *reclaimed asphalt pavement* (RAP). Neste sentido, a reciclagem de pavimentos se apresenta como uma opção. Os principais agentes aglomerantes utilizados na reciclagem de pavimentos são o cimento Portland e a emulsão asfáltica. Em se tratando da emulsão asfáltica, ainda não há consenso sobre o comportamento de misturas recicladas com este aglomerante. Em face disto, a presente proposta de pesquisa se baseia na análise mecânica da mistura reciclada com emulsão asfáltica de engenharia para reciclagem quanto ao desempenho desta mistura sob duas óticas de comportamento: uma delas sendo a mistura suscetível a trincamentos por fadiga, e a segunda analisando-se a mistura como material granular sujeito à deformação permanente. Em face disto, estudos de laboratório serão conduzidos a fim de cumprir este objetivo do trabalho. Em paralelo, foi executado um trecho de reciclagem com emulsão asfáltica na Rua Nicola Pellanda, em Curitiba/PR. A mistura utilizada na obra foi dosada com base na norma FDR201A da *Asphalt Recycling and Reclaiming Association*, publicada em 2018. O objetivo da execução da obra é subsidiar com dados de campo a análise do comportamento da mistura, por meio de *softwares* de análise e dimensionamento mecanístico-empíricos. Espera-se com a pesquisa entender o comportamento mecânico de misturas recicladas com emulsão asfáltica, contribuir para a disseminação da técnica de execução e redigir proposta de especificação normativa nacional.

PALAVRAS-CHAVE: emulsão asfáltica; reciclagem; pavimentos.

ABSTRACT

The bad conservation of a large part of Brazilian highways promotes the search for pavement recovery techniques, combined with the reuse of reclaimed asphalt pavement (RAP). For this, recycling pavements presents itself as an option. The main binding agents used in recycling pavements are asphalt emulsion and Portland cement. The use of asphalt emulsion has generate no consensus about the behavior of mixtures recycled with this binder. Therefore, the present proposal research is based on the mechanical analysis of a recycled mixture with engineering recycling asphalt emulsion regarding the performance of this mixture from two behavioral perspectives: one of them being the mixture susceptible to fatigue cracking, and the second analyzing the mixture as a granular material subject to permanent deformation. Laboratory studies will be programmed to fulfill this work objective. In parallel, a recycling section with asphalt emulsion was carried out on Nicola Pellanda street, in Curitiba/PR. The mixture used in the construction was dosed based on the FDR201A standard of the Asphalt Recycling and Reclaiming Association, published in 2018. The objective of carrying out the pavement recycling is to support the analysis of the mixture's behavior with field data, using mechanistic-empirical analysis and design from specific softwares. The research is expected to understand the mechanical behavior of recycled mixtures with asphalt emulsion, contribute to disseminate the execution technique and write the proposal for a national standard with asphalt emulsion used in pavements recycling.

KEY WORDS: asphalt emulsion; recycling; pavements.

¹ E-Vias Tecnologia em Infraestrutura Viária Ltda., douglas.thiel@e-vias.com.br; allan@e-vias.com.br; rafaelreis173@gmail.com.

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná, matheusdomingos@utfpr.edu.br.

³ Compasa do Brasil, yan@compasa.com.br; joel.silveira@compasa.com.br.



INTRODUÇÃO

O Brasil é um País que optou majoritariamente pelo modal rodoviário para escoamento de produção e transporte de pessoas. A maioria dos pavimentos é composta por Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), também designado como mistura asfáltica a quente. Apesar dessa relevância, grande parte das rodovias brasileiras possui estado de conservação ruim. Dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023) estimam que houve um aumento de quase 33% no custo do transporte rodoviário em relação a 2022, tendo em vista justamente esta má conservação dos pavimentos rodoviários. Em se tratando do estado do Paraná, a CNT (2023) evidenciou que 43,7% das rodovias analisadas apresentaram condição de conservação regular, ruim e péssima.

Tais dados trazem um alerta quanto às técnicas de recuperação de pavimentos, que, além de suprir as necessidades de trafegabilidade, também permitam reaproveitar os materiais existentes. A reciclagem de pavimentos *in situ* tem se mostrado uma opção para a recuperação de revestimentos degradados. A reciclagem de pavimentos *in situ* é indicada para o tratamento de defeitos como camadas trincadas, ondulações, trilhas de roda e correção de greide (ABEDA, 2018). A principal vantagem deste tipo de recuperação de pavimentos reside na reutilização do material fresado, o RAP (*reclaimed asphalt pavement*), que costuma ser destinado a bota-foras na maioria dos casos (ALMEIDA *et al.*, 2014).

O processo de reciclagem de pavimentos *in situ* consiste na fresagem do revestimento, podendo incluir também a base (total ou parcial). Juntamente com o processo de trituração das camadas do pavimento, há também a adição de material um material aglutinante como cimento Portland ou emulsão asfáltica. Isto é feito para aglomerar as partículas de agregados em uma nova camada. A adição de material granular virgem para correção granulométrica e *filler* também são admitidos. A mistura reciclada pode atuar como base para novo revestimento ou, por si só, servir como revestimento (ABEDA, 2018).

Estudos têm sido conduzidos para analisar o comportamento mecânico do cimento Portland e da emulsão asfáltica como agentes aglomerantes na reciclagem de pavimentos. A adição de cimento na mistura reciclada acarreta um aumento no módulo de resiliência e na resistência à tração do material. Também são relatados efeitos positivos na redução da deformação permanente. A emulsão asfáltica promove ligações entre as partículas de agregado, resultando em aumento da coesão e da resistência à deformação permanente. Por outro lado, a utilização de emulsão como agente aglomerante resulta em comportamento viscoelástico da mistura devido



DOI: [10.29327/1430212.49-111](https://doi.org/10.29327/1430212.49-111)

PROPOSTA DE ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO IN SITU COM EMULSÃO ASFÁLTICA:
ESTUDO DE CASO EM UMA VIA URBANA DE CURITIBA/PR

às características do ligante asfáltico. Consequentemente, variáveis como frequência de carregamento e temperatura podem interferir no desempenho de camadas recicladas com emulsão asfáltica (KAVUSSI; MODARRES, 2010).

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) publicou a norma 167/2013-ES (DNIT, 2013), que trata do método de dosagem e de execução de reciclagem *in situ* utilizando o cimento Portland como agente aglomerante. Entretanto, ainda não há consenso sobre procedimentos de dosagem e execução nas especificações nacionais e estrangeiras a respeito da utilização de emulsão asfáltica na reciclagem de pavimentos (FEDRIGO; NUNES; VISSER, 2020).

Em face desta lacuna sobre o processo mais adequado de dosagem e execução de reciclagem de pavimentos *in situ* utilizando emulsão asfáltica, estudos têm sido conduzidos para avaliar o comportamento de misturas recicladas com a emulsão. Lee, Wilson e Hassan (2017) seguiram abordagem de análise do comportamento mecânico de camadas recicladas com emulsão asfáltica por meio de ensaios triaxiais dinâmicos, considerando tensões de topo e de confinamento nos corpos de prova. Nesta hipótese, a camada produto da reciclagem é tratada como material granular aglutinado com emulsão e suscetível a danos por deformação permanente, proveniente das tensões cisalhantes. Também se verificou que a tensão confinante exerce influência no módulo de resiliência do material. Almeida *et al.* (2014) seguiram a mesma abordagem e verificaram o comportamento de misturas recicladas *in situ* por meio da aplicação de tensões desvio e de confinamento.

Já Fedrigo, Nunez e Visser (2020) tem indicado que o trincamento por fadiga é um dos principais mecanismos de ruptura deste tipo de camada. Nesta abordagem, tanto o módulo de resiliência quanto a curva de fadiga seriam determinados por meio da aplicação de tensões de carregamento e descarregamento via diametral.

Diante do exposto, o objetivo principal do estudo em questão reside na verificação do comportamento mais adequado para descrever misturas de reciclagem *in situ* com emulsão asfáltica. Também foram considerados dois critérios de ruptura (fadiga e deformação permanente) para uma análise mecanístico-empírica de dimensionamento de pavimentos com este tipo de material.

DOSAGEM DA MISTURA RECICLADA

Para cumprir o objetivo principal da pesquisa, foi selecionado um trecho da rua Nicola Pellanda, Bairro Umbará, em Curitiba/PR. Conforme mostrado nas Figuras 1a e 1b, a rua em questão apresentava inúmeros defeitos, sobretudo trilhas de roda, trincas isoladas e interligadas, desgaste e remendos. Um levantamento visual



Douglas Antônio Thiel, Matheus David Inocente Domingos,
Allan Monteiro Silva, Yan Gorski de Campos Malta,
Rafael Marçal Martins de Reis, Joel Silveira

contínuo (LVC) nesta rua e segundo a norma DNIT 008/2003-PRO (DNIT, 2003) resultou em um índice de gravidade global expedito (IGGE) de 277, o que classifica o estado da superfície como péssimo. Tal classificação implica uma reconstrução do pavimento. Este LVC ocorreu em uma extensão de 2 km, segmentada em dois trechos: o primeiro, com 850 m e início nas coordenadas geográficas 25°36'32"S 49°16'37"W e término nas coordenadas 25°36'08"S 49°16'37"W. O segundo trecho tem uma extensão de 1.150 m, com início nas coordenadas 25°35'11" S 49°16'28"W e término nas coordenadas 25°34'38"S 49°16'31"W.

Após a realização do LVC, procedeu-se à coleta de amostras de RAP+base. Para isso, uma recicladora da marca Wirtgen foi utilizada na coleta das amostras. A fresagem da pista ocorreu a uma profundidade de 18 cm, o que compreende todo o revestimento asfáltico (espessura variando de 5,5 a 10,0 cm) e o restante composto por base de brita graduada simples. O material produzido pela recicladora foi coletado em 04 pontos, sendo dois em cada um dos trechos supracitados. As amostras foram transportadas até o Laboratório Central da empresa E-VIAS para caracterização e dosagem de mistura reciclada com emulsão asfáltica.



Figura 1. a) Visão geral do pavimento da rua Nicolla Pellanda; b) Realce para as trincas interligadas tipo couro-de-jacaré encontrados na Rua Nicola Pellanda

Para fins de dosagem da mistura reciclada RAP+base e emulsão asfáltica, utilizou-se a norma norte-americana FDR201A (ARRA, 2018). De acordo com este método, a inserção de material de *filler* é admitida e foi escolhido nesta pesquisa o teor de 1% de cimento Portland tipo CP IV F-32. Estudos que combinam emulsão e cimento



DOI: 10.29327/1430212.49-111

PROPOSTA DE ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO IN SITU COM EMULSÃO ASFÁLTICA:
ESTUDO DE CASO EM UMA VIA URBANA DE CURITIBA/PR

como agente acelerador do processo de rompimento da emulsão já foram conduzidos (ALMEIDA *et al*, 2014).

Inicialmente, foi conduzido o processo de determinação do teor ótimo de fluidos e da densidade máxima aparente seca (γ_{max}), conforme a norma DNER-ME 162/94 (DNER, 1994b). Os resultados obtidos foram um teor ótimo de fluidos igual a 6,5% e $\gamma_{max} = 2,086 \text{ g/cm}^3$. Posteriormente, foi obtida a granulometria da amostra segundo a norma DNER-ME 083/98 (DNER, 1998). A distribuição granulométrica do material pode ser conferida na Figura 2. Nota-se que esta distribuição granulométrica, referente à média de todas as amostras colhidas em campo, atende aos pontos de controle citados na especificação FDR201A (ARRA, 2018). Na prática, o enquadramento da granulometria nestes pontos de controle dispensa a composição com material virgem adicional. Também, foi calculada a curva de densificação máxima segundo a equação de Fuller-Talbot (Figura 2), a qual está próxima da granulometria original do material coletado em campo. Materiais com bom índice de densificação tendem a ter bom comportamento mecânico, especialmente quanto à deformação permanente (BERNUCCI *et al.*, 2022).

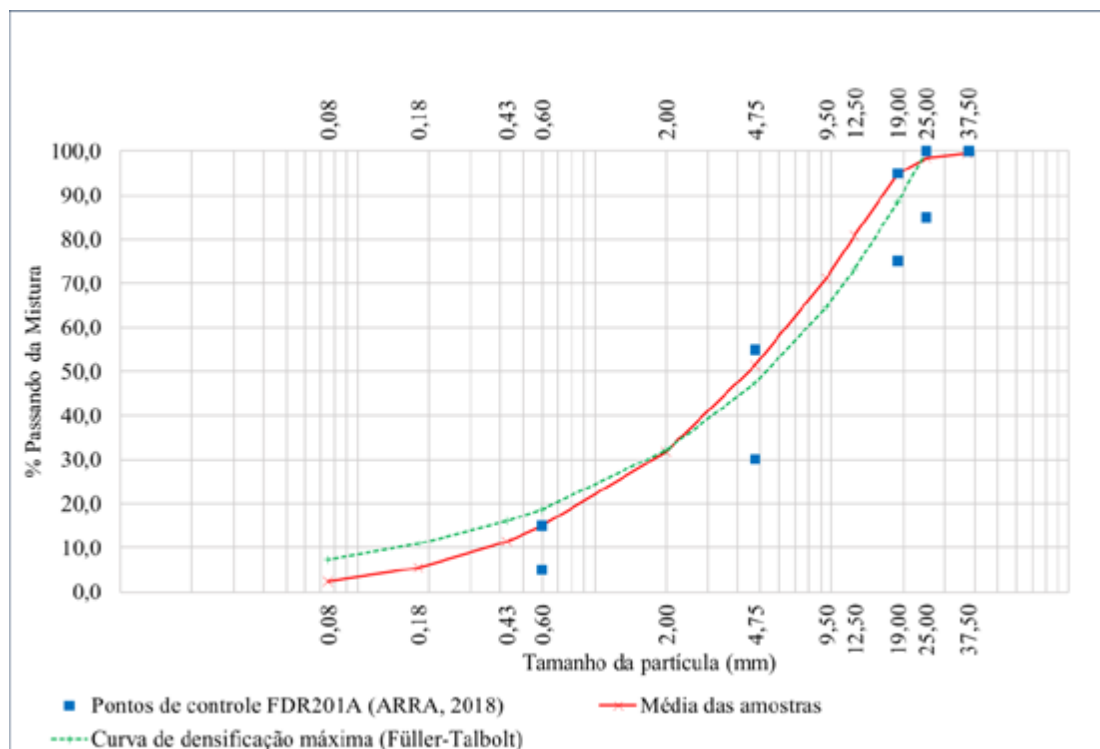


Figura 2. Distribuição granulométrica da média das amostras de RAP coletadas em campo

Para a produção das misturas recicladas, foi selecionada uma emulsão asfáltica de engenharia, com propriedades adequadas de mistura, cura e coesão em relação ao



material a ser reciclado. As características e parâmetros limites estabelecidos para produção industrial desta emulsão (EARP) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultado da caracterização da emulsão asfáltica utilizada na dosagem das misturas recicladas

TIPOS DE ENSAIOS	UNIDADE	VALORES ESPECIFICADOS		RESULTADOS
		LIM. MÍNIMO	LIM. MÁXIMO	
Carga de partícula	-	positiva	-	positiva
Viscosidade Saybolt-Furol, 50°C	s	-	70	18
Sedimentação, 5 dias	(%)	-	5	2,6
Peneiramento, peneira 0,84 mm	(%)	-	0,1	0,02
Resíduo por evaporação	(%)	60	-	62,4
pH	-	-	6,5	2,8

Conforme disposto na norma ARRA (2018), a produção das misturas deve ocorrer em misturador mecânico e pelo tempo máximo de 60 s. A norma prevê que seja definido um teor de emulsão, a partir do qual se deva variar $\pm 0,5\%$ e $\pm 1,0\%$. Neste sentido, tendo sido arbitrado o valor de 3,5%, foram produzidas misturas com teores de 2,5, 3,0, 3,5, 4,0 e 4,5% de emulsão. Além do percentual de emulsão, também foi adicionada água em cada uma das misturas para atingir o teor ótimo de fluidos (6,5%). Todas as misturas continham também 1% de cimento Portland. Antes da compactação, determinadas amostras foram separadas para obtenção da densidade relativa máxima medida (G_{mm}) conforme norma DNIT 427/2020-ME (DNIT, 2020). Logo após o processo de mistura, as amostras foram colocadas em sacos herméticos para cura durante 30 min e a uma temperatura controlada de 40°C. Na sequência, foram moldados seis corpos de prova para cada um dos teores no compactador giratório Superpave (CGS). Foram utilizados moldes cilíndricos com diâmetro de 150 mm e altura desejada de 75 mm. A massa adicionada em cada corpo de prova foi obtida por meio do valor de γ_{max} identificado no ensaio de compactação. No CGS, cada corpo de prova foi submetido a 30 giros, com ângulo de 1,25° e pressão de 600 kPa.

Após a produção dos corpos de prova, estes foram inseridos em forno de ventilação forçada para cura. A temperatura foi fixada em 60°C, sendo que as amostras permaneceram nesta condição pelo período de 36 h. Na sequência, todos os corpos de prova foram retirados e deixados em sala com temperatura controlada em 25°C e por um tempo de 16 h.

Três corpos de prova foram então moldados para cada um dos teores acima e submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) (DNIT, 2018c). O método de dosagem da mistura reciclada prevê que seja utilizado como um critério de aceitação o teor de emulsão asfáltica no qual o resultado deste ensaio seja maior que 276 kPa. Ainda, outros três corpos de prova de cada teor foram



DOI: 10.29327/1430212.49-111

PROPOSTA DE ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO IN SITU COM EMULSÃO ASFÁLTICA:
ESTUDO DE CASO EM UMA VIA URBANA DE CURITIBA/PR

submetidos ao processo de saturação por meio de imersão em água e vácuo entre 2 e 10 psi. O vácuo foi aplicado até a saturação nos corpos de prova em teores entre 55 e 75%. Tais corpos de prova condicionados foram igualmente submetidos ao ensaio de RTCD, cujo resultado deve ser de pelo menos 172 kPa segundo os critérios da ARRA (2018).

Um resumo das condições de dosagem das misturas asfálticas pode ser encontrado na Tabela 2. É possível observar que as misturas com teor de emulsão inferiores a 3,5% não atenderam ao valor mínimo de 276 kPa no RTCD. No caso da condição saturada, o valor de RTCD dos corpos de prova condicionados atendeu ao parâmetro estabelecido pela ARRA (2018), independente do teor.

Em linhas gerais, observou-se que a dosagem da mistura reciclada (RAP+base e emulsão asfáltica) foi estabelecida como sendo um teor de projeto igual a 3,4% para a emulsão e um teor de água de 3,1%.

Tabela 2. Resultado da dosagem das misturas recicladas com emulsão asfáltica e em diversos teores de emulsão

COMPOSIÇÃO DA MISTURA	UNIDADE	AMOSTRA	AMOSTRA	AMOSTRA	AMOSTRA	AMOSTRA
		I	II	III	IV	IV
Material local (RAP+base)	%	1	1	1	1	1
Cimento	%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Teor de emulsão FDR	%	2,5%	3,0%	3,5%	4,0%	4,5%
Teor de água adicionada	%	4,0%	3,5%	3,0%	2,5%	2,0%
Densidade aparente (<i>Gmb</i>)	g/cm ³	2,067	2,080	2,088	2,088	2,088
Densidade máxima medida (<i>Gmm</i>)	g/cm ³	2,478	2,446	2,441	2,436	2,435
Volume de vazios	%	17%	16%	16%	16%	16%
RTCD	kPa	247	272	304	320	336
RTCD condicionada	kPa	185	238	251	263	269
RTCD conservada	(%)	75%	88%	83%	82%	80%

EXECUÇÃO DA OBRA E ESTUDOS POSTERIORES

Os dois trechos supracitados foram divididos em duas partes, conforme explicado anteriormente. Cada uma destas partes foi selecionada para a execução da reciclagem com emulsão asfáltica. A emulsão foi produzida pela Compasa do Brasil (Curitiba/PR) e disponibilizada para a execução da obra, e um comboio composto por caminhão-pipa com água, carreta de emulsão e recicladora (Figura 3) foi utilizado para realização da reciclagem profunda *in situ* dos trechos em questão. Todo este processo ocorreu no mês de janeiro de 2024.



Douglas Antônio Thiel, Matheus David Inocente Domingos,
Allan Monteiro Silva, Yan Gorski de Campos Malta,
Rafael Marçal Martins de Reis, Joel Silveira



Figura 3. Comboio de execução de reciclagem profunda utilizado na rua Nicola Pellanda

Durante a execução da obra, foram realizados ensaios de monitoramento de densidade *in situ*, coleta de amostras para extração de taxa de aplicação de emulsão asfáltica e granulometria da mistura. Além disso, foi feita a coleta de amostras de campo para a produção de corpos de prova, que embasarão pesquisas futuras.

Com as amostras, serão realizados ensaios de caracterização de resistência mecânica das misturas. Neste sentido, cabem destacar os ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral (DNIT, 2018b) e comportamento à fadiga da mistura (DNIT, 2018e). Com o auxílio da prensa triaxial, serão realizados os procedimentos de módulo de resiliência sob tensões desvio e confinante (DNIT, 2018a) e do comportamento à deformação permanente (DNIT, 2018d). Serão consideradas variáveis como tempo de cura e temperatura e sua influência no comportamento mecânico das misturas, conforme proposto por Kavussi e Modarres (2010).

Com estes resultados, pretende-se realizar o dimensionamento mecanístico-empírico do pavimento. Para tal, será utilizado o *software* MEDINA com as condições reais da rodovia e contagens atualizadas de tráfego, tendo em vista os protocolos estabelecidos no Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2006). Além disso, está prevista a utilização de outros *softwares* de análise mecanística-empírica do pavimento executado com a mistura reciclada, como o Elsym5®.

Para fins de avaliação do desempenho da estrutura a longo prazo, será feito um monitoramento do desempenho da mistura. Neste sentido, serão conduzidos ensaios de carregamento para verificação da deflexão do pavimento, em conformidade com a norma DNER-ME 024/94 (DNER, 1994a) e a intervalos regulares de seis meses. A utilização do *software* BackMedina é prevista para fins de retroanálise dos valores de módulo de resiliência do pavimento. Também está prevista a coleta de amostras por meio de sonda rotativa para a realização de ensaios complementares. A cada ano,



[DOI: 10.29327/1430212.49-111](https://doi.org/10.29327/1430212.49-111)

PROPOSTA DE ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO IN SITU COM EMULSÃO ASFÁLTICA:
ESTUDO DE CASO EM UMA VIA URBANA DE CURITIBA/PR

pretende-se realizar o levantamento de defeitos de superfície na rodovia por meio do LVC (DNIT, 2003).

RESULTADOS ESPERADOS

Por meio da condução desta pesquisa, espera-se contribuir quanto ao monitoramento do desempenho de misturas recicladas com emulsão em pavimentos de campo, uma vez que ainda não há consenso na literatura a respeito de seus mecanismos de ruptura. Também se espera disseminar o uso deste tipo de material em novas obras de pavimentos no País e fornecer subsídios técnicos para justificar tal utilização, bem como colaborar na redação e/ou revisão de normas nacionais para controle de qualidade e execução de obras com este material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Letícia Rezende de; BESSA, Iuri Sydnei; VASCONCELOS, Kamila L.; BERNUCCI, Leidi Légi Bariani; BEJA, Igor Amorim; CHAVES, José Mario. Análise de propriedades físicas e mecânicas de misturas asfálticas recicladas a frio com emulsão asfáltica e cimento Portland e a influência de cada material. XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, **Anais**, Curitiba, 12 p., 2014.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION (ARRA). **FDR201A**: Recommended mix design guidelines for full depth reclamation (FDR) using emulsified asphalt stabilizing agent. Illinois, 2018. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO (ABEDA). **Informativo Técnico nº 9**: reciclagem de pavimentos a frio *in situ* com emulsão asfáltica. Rio de Janeiro: ABEDA, 2018. 25 p.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 2ª ed. Rio de Janeiro: Petrobras/ABEDA, 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2023**. 204 p. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **024**: Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994a, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **162**: Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994b, 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **083**: Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998, 5 p.



Douglas Antônio Thiel, Matheus David Inocente Domingos,
Allan Monteiro Silva, Yan Gorski de Campos Malta,
Rafael Marçal Martins de Reis, Joel Silveira

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **008**: Levantamento visual contínuo para avaliação de superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – procedimento. Rio de Janeiro, 2003, 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro, 2006, 388 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **167**: Pavimentação – reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2013, 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **134**: Pavimentação – solos – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018a, 18 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **135**: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018b, 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **136**: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à compressão por tração diametral – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018c, 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **179**: Pavimentação – solos – determinação da deformação permanente – instrução de ensaio. Rio de Janeiro, 2018d, 20 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **183**: Pavimentação asfáltica – ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018e, 15 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **427**: Pavimentação – misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020, 9 p.

FEDRIGO, William; NUNEZ, Washington Peres; VISSER, Alex T.. A review of full-depth reclamation of pavements with Portland cement: Brazil and abroad. **Construction and Building Materials**, v. 262, 120540, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120540>.

KAVUSSI, Amir; MODARRES, Amir. A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2252-2259, nov. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.031>.

LEE, Kang-Won Wayne; WILSON, Kathleen; HASSAN, Syed Amir. Prediction of performance and evaluation of flexible pavement rehabilitation strategies. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 4, n. 2, p. 178-184, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtte.2017.03.005>.



ANÁLISE DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS EM MISTURAS DE RAP, SOLO ARGILOSO E CIMENTO PORTLAND

Guilherme Bravo de Oliveira Almeida¹; Helen Mariana Ribeiro Fontes² & Lucila Costa Sales³

RESUMO

O pavimento asfáltico, ao ser deteriorado, pode ser removido através do processo denominado fresagem. O resíduo gerado são fragmentos do concreto asfáltico envelhecido. Esses se apresentam como material de qualidade que pode ser incorporado ao solo promovendo a estabilização granulométrica. Associada a estabilização química, a mistura solo-fresado-aditivo pode constituir-se como um material de construção, especialmente na pavimentação. Pesquisas apresentam a viabilidade do uso de misturas de solo e fresado com ou sem aditivos com o objetivo de alterar algumas propriedades. Assim, esta pesquisa tem o objetivo de analisar, física e mecanicamente, algumas propriedades geotécnicas de misturas de concreto asfáltico fresado, solo argiloso e cimento Portland de alta resistência inicial para fins de utilização em camadas do pavimento. A marcha de ensaios envolveu a caracterização física e mecânica, seguindo procedimentos normativos, de misturas contendo 20, 30 e 50% de material fresado e o teor fixo de 5% cimento. Dos resultados foi possível verificar que adição de material fresado alterou a granulometria, apresentou uma tendência de redução da plasticidade, porém, não alterou a classificação do solo. Quanto à caracterização mecânica, o fresado faz aumentar a massa específica aparente seca máxima e diminuir o teor de umidade ótimo. Em relação as resistências, o teor de 30% de fresado apresentou maior resistência à compressão e à tração. Portanto, esta pesquisa demonstrou que o material fresado, ao ser misturado ao solo argiloso e ao teor de 5% de cimento Portland, altera certas propriedades geotécnicas. No entanto, neste caso, não sendo possível a aplicação como camada do pavimento. Não obstante, a mistura pode ser trabalhada e ajustada, segundo os critérios normativos, propondo-se ser um material aplicável em obras geotécnicas com alto consumo de material, a exemplo de obras rodoviárias.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de Solo; RAP; Cimento Portland.

ABSTRACT

When asphalt paving deteriorates, it can be removed through a process called milling. The waste generated is fragments of aged asphalt concrete. These are a quality material that can be incorporated into the soil, promoting granulometric stabilization. Combined with chemical stabilization, the soil-milled-additive mixture can be used as a construction material, especially for paving. Research shows the feasibility of using soil-milled mixtures with or without additives in order to alter certain properties. Therefore, this research aims to analyze, physically and mechanically, some geotechnical properties of mixtures of milled asphalt concrete, clayey soil and high-early strength Portland cement for use in pavement layers. The tests involved the physical and mechanical characterization, following standard procedures, of mixtures containing 20, 30 and 50% milled material and a fixed content of 5% cement. The results show that the addition of milled material altered the grain size and showed a tendency to reduce plasticity, but did not change the soil classification. In terms of mechanical characterization, the milled material increased the maximum dry density and decreased the optimum moisture content. In terms of strength, the 30% milled content showed higher unconfined compressive and indirect tensile strengths. Therefore, this research demonstrated that the milled material, when mixed with clayey soil and a 5% Portland cement content, alters certain geotechnical properties. However, in this case, it is not possible to apply as pavement layer. The mixture can be worked on and adjusted, according to regulatory criteria, proposing to be a material applicable in geotechnical works with high material consumption, such as road works.

KEY WORDS: Soil Stabilization; RAP; Portland Cement.

¹ Professor Adjunto, Universidade Federal de Sergipe, gbravo1982@gmail.com

² Graduanda, Universidade Federal de Sergipe, mafonteshelen@gmail.com

³ Analista em Infraestrutura de Transportes, DNIT, lucila.sales@dnit.gov.br



INTRODUÇÃO

Quando um pavimento asfáltico se torna deteriorado, é necessário restaurá-lo, o que pode ser feito através da execução de espessuras adicionais de camadas ou através de corte de todo ou parte do revestimento deteriorado e execução de nova camada. O corte de todo ou parte do revestimento deteriorado é realizado através de máquina fresadora, que utiliza rolos especiais munidos de pontas diamantadas cortantes para realizar o desbaste (BERNUCCI et al., 2008).

Assim, o material gerado na operação de fresagem nada mais é do que o revestimento asfáltico removido de ruas, avenidas ou estradas deterioradas quando da sua manutenção, reconstrução ou restauração. Trata-se, portanto, de fragmentos de concreto asfáltico envelhecido. Segundo Bonfim (2007), esse material possui características nobres e, por isso, pode ser reutilizado como material de pavimentação. Na bibliografia internacional, é conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement*, resumida pela sigla RAP. Bonfim (2007) realizou um estudo detalhado com esse material, incluindo a granulometria com e sem extração do betumo do fresado.

Os efeitos da adição do material fresado ao solo podem ser observados em algumas das propriedades como granulometria, densidade dos grãos, limites de Atterberg, compactação e resistência. Essa incorporação pode proporcionar ao solo uma estabilização mecânica através da correção na sua granulometria. Entende-se que essa correção pode ser conseguida pela adequada distribuição das diversas porções de diâmetro dos grãos. Senço (2001) explica que os vazios dos grãos maiores são preenchidos pelos grãos médios, e os vazios desses, pelos miúdos. Assim, a estrutura densa representa um produto de massa específica aparente superior à dos componentes, o que lhe dá maior resistência e impermeabilidade, promovendo benefícios ao material de pouca qualidade.

O método físico de estabilizar o solo, através da compactação, possibilita uma melhoria daquelas propriedades. Em concordância com Das (2007), a compactação de um solo deixa-o mais denso, através da remoção do volume de ar. Para isso, deve ser aplicada certa energia, o que promoverá melhorias ao solo com o aumento na sua resistência e diminuição da permeabilidade.

Não só a estabilização física, mas também a química pode se somar e promover alterações no solo de forma a modificar ou aglutinar os grãos, trazendo melhorias em uma ou mais propriedades do solo. Segundo Cruz e Jalali (2010), este tipo de estabilização se apresenta como a melhor alternativa para estabilizar solos para fins rodoviários. A eficiência de um ou outro aditivo depende mais do tipo do solo. No entanto, qualquer solo pode ser estabilizado, não existindo o melhor, mas o mais indicado. Entre os aditivos cal, betume e cimento Portland, este último tem um campo de aplicação mais generalizado, dada a sua facilidade de obter e adequabilidade a maioria dos solos (LITTLE, 1995).

Kamel, Al-Bustami e Alsulami (2016) verificaram uma diminuição nos valores dos limites de Atterberg das misturas com o aumento do teor de material fresado, levando aquelas com maiores teores a condição não plástica.

Alhaji e Alhassan (2018), em seu estudo sobre estabilização de uma argila muito mole e expansiva com material fresado, verificaram um decréscimo gradual na densidade real das misturas com o aumento do teor de material fresado até 80%. A partir daí, foi observada uma queda brusca na densidade até um teor de 100% de material fresado. Essa tendência foi justificada por uma maior densidade apresentada pela argila (2,49), em relação ao do fresado (2,01).

Alhaji et al. (2019), em seu estudo sobre tratamento de solos lateríticos com material fresado e cimento, observaram uma tendência de aumento da massa específica seca máxima com o aumento



DOI: [10.29327/1430212.49-21](https://doi.org/10.29327/1430212.49-21)

ANÁLISE DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS EM MISTURAS DE RAP, SOLO ARGILOSO E CIMENTO PORTLAND

do teor de material fresado até 120% por peso do solo. A partir daí, os valores decresceram. O aumento do teor de material fresado melhorou a graduação do solo, o que provocou um aumento na massa específica da mistura. Segundo os autores, o aumento da quantidade de material fresado além de 120% do peso do solo resultou na criação de novos vazios, o que reduziu a massa específica da mistura.

Com relação à umidade ótima, Alhaji et al. (2019) observaram uma diminuição da umidade ótima com o aumento do teor de material fresado até o teor de 120% em peso do solo. A partir daí, observou-se um aumento na umidade ótima. Segundo os autores, a redução na umidade ótima se deve à diminuição da quantidade de solo laterítico, que contém um alto teor de finos, e ao aumento da quantidade de material fresado, que apresenta pouca ou nenhuma absorção de água. Já o aumento observado a partir dos 120% em peso de solo de material fresado foi justificado pela criação de novos poros pelo excesso de material fresado.

Diante do exposto, esta pesquisa teve como objetivo analisar, física e mecanicamente, propriedades geotécnicas de misturas de concreto asfáltico fresado, solo argiloso e cimento Portland para fins de utilização em camadas do pavimento. A hipótese formulada está baseada na influência que os teores de material fresado podem proporcionar, em um solo fino incorporado ao teor fixo de aditivo, promovendo alterações nas propriedades geotécnicas, com consequência utilização como camada de pavimento.

PROGRAMA LABORATORIAL

O material fresado foi proveniente de ruas e avenidas da cidade de Aracaju/SE, sendo coletado na usina de asfalto da Empresa Municipal de Obras e Urbanização (EMURB) localizada em São Cristóvão/Se. O solo foi coletado na jazida Cajueiro, também localizada no mesmo município. O cimento utilizado foi o CP V – ARI, por possuir menos adições em sua composição, apresentar alta resistência inicial e ser de fácil aquisição no mercado.

As misturas envolveram teores de 20, 30 e 50% de material fresado, com o objetivo de estabilizar granulometricamente, e 5% de cimento Portland, com o objetivo de estabilizar quimicamente. Essas porcentagens foram tomadas em relação à massa total da mistura.

Os ensaios envolvidos neste programa seguiram os procedimentos normativos listados abaixo:

a) Preparação de amostras

A norma DNER-ME 041: solo – preparação de amostras para ensaios de caracterização foi utilizada para preparar os materiais.

b) Caracterização física

Para caracterização física foram utilizadas as normas DNER-ME 051: solos – análise granulométrica, DNER-ME 093: solos – determinação da densidade real, DNER-ME 082: solo – determinação do limite de plasticidade e DNER-ME 122: solo – determinação do limite de liquidez. No material fresado, será verificada a norma DNIT-ME 412: pavimentação – misturas asfálticas: análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento.

c) Caracterização mecânica

Para obtenção dos parâmetros de compactação serão utilizadas as normas DNER-ME 162: solo – compactação utilizando amostras trabalhadas, considerando a energia de compactação modificada (método C).

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados de acordo com o indicado na norma DNER-ME 201: solo-cimento – compressão axial de corpos de prova cilíndricos. A prensa



utilizada para rompimento dos corpos de prova foi a EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaio modelo máquina universal de ensaios eletrodinâmica e microprocessada DL 20000, pertencente ao Laboratório de Materiais de Construção e Estrutura.

A resistência à tração por compressão diametral será determinada, tomando-se como base a norma DNIT-ME 136 pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à compressão diametral, tendo em vista a ausência de normativo referente a solo. A prensa utilizada para romper os corpos de prova foi o modelo I-2001-A Prensa Marshall Elétrica com anel dinamométrico com capacidade de 5.000 Kgf e extensômetro de resolução 0,001 mm, pertencente ao Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal de Sergipe.

Os corpos de prova moldados para os ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral ficaram submetidos à cura por sete dias em câmara úmida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra as curvas granulométricas do solo puro, material fresado (MF) e misturas envolvendo solo e teores de 20, 30 e 50% MF.

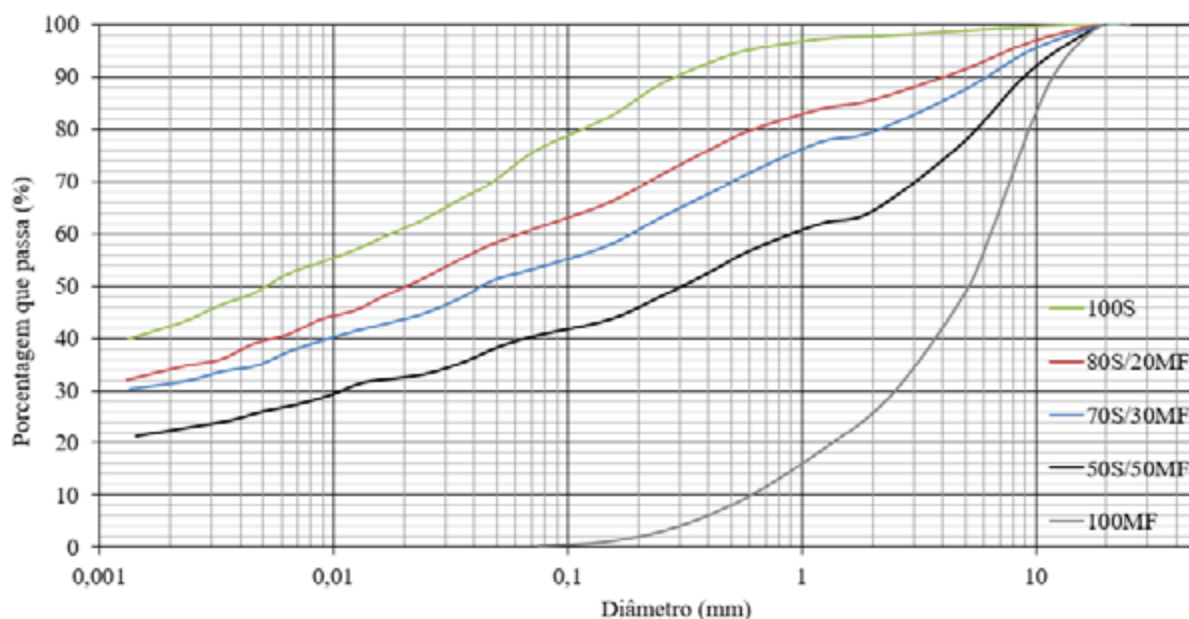


Figura 1. Curvas granulométricas do solo, material fresado (MF) e misturas % solo % MF (AUTOR, 2024).

Ao comparar a granulometria do solo com as misturas, observam-se variações em todas as frações, porém, a fração areia não apresentou grandes diferenças (variação máxima de 4,3%). Essa baixa variação é justificada pela mesma proporção de areia que contém no material fresado (25,31%). Ao se misturar solo e material fresado, apenas retira-se a fração areia do solo e acrescenta a fração areia do material fresado. Assim, a proporção se mantém próxima.

Entretanto, a fração pedregulho comporta-se de maneira diferente, uma vez que o baixo teor deste tamanho de grão no solo é baixo (2,27%). Ao se misturar solo e material fresado, o acréscimo de partículas maiores, dado pelo material fresado, aumenta a diferença entre as misturas com o aumento da porcentagem de material fresado. Na Figura 1 pode-se observar uma queda das curvas



DOI: 10.29327/1430212.49-21

ANÁLISE DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS EM MISTURAS DE RAP,
SOLO ARGILOSO E CIMENTO PORTLAND

até o diâmetro 2 mm, representando uma maior quantidade de material retido neste diâmetro que corresponde a fração pedregulho.

Por outro lado, as frações silte e argila apresentaram reduções. Essa diminuição, aproximadamente a metade, acontece pela quase ausência de grãos menores que 0,075 mm no material fresado. Da Figura 1, nota-se certo paralelismo nas curvas granulométricas a partir do diâmetro 0,075 mm.

Para a faixa correspondente aos diâmetros 2 a 0,075 mm, nota-se, a partir de observações da Figura 1, a formação de um pequeno patamar entre 1 e 2 mm seguido de uma mudança de angulação das curvas do solo e das misturas. Esse comportamento da curva está relacionado à mesma proporção da fração areia que existe entre o solo e o material fresado.

A Tabela 1 apresenta dados em porcentagens do material passante nas peneiras N°4 (#4,8 mm), N°10 (2 mm), N° 40 (0,42 mm), N°200 (#0,075 mm). Além desses dados, a Tabela fornece os resultados dos limites de Atterberg, densidade real dos grãos, índice de grupo e a classificação do solo, do material fresado e das misturas estudadas, de acordo com a AASHTO.

Tabela 1. Dados de parte da granulometria, limites de Atterberg, densidade real, índice de grupo e classificação do solo puro, material fresado e misturas do solo e material fresado (AUTOR, 2024).

Composição granulométrica					L _L (%)	I _p (%)	D ₂₀	IG	Classificação da amostra
% que passam nas peneiras									
Amostra	# 4	# 10	# 40	# 200					AASHTO/TRB
Solo puro	98,75	97,73	92,97	75,99	51	28	2,66	18	A-7-6
80% Solo 20% MF	91,11	85,47	76,36	61,00	49	26	2,59	13	A-7-6
70% Solo 30% MF	87,29	79,56	68,19	53,52	48	27	2,59	11	A-7-6
50% Solo 50% MF	77,29	64,41	53,11	40,56	46	25	2,48	6	A-7-6
Material fresado	47,61	25,31	6,42	0,23	NP	NP	2,26	0	A-1-a

Da Tabela 1 é possível observar que, para a classificação AASHTO, a adição dos teores estudados de material fresado não foi suficiente para alterar o grupo do solo, permanecendo como A-7-6. Para o índice de grupo (IG), ocorreu uma redução à medida que o acréscimo de material fresado foi incorporado ao solo. Isso é atribuído aos limites de Atterberg e a fração passante na peneira 0,075 mm que diminuíram. Como não ocorreram mudanças no grupo de solo para os três teores de material fresado, a avaliação geral para o solo e as misturas é que o material estudado ainda é fraco a ruim como subleito.

Quanto à plasticidade, os valores de IP reduzem ao incorporar o material fresado. Porém, essa redução não seguiu uma proporção ao adicionar o material fresado. Isso pode ser explicado: ao se adicionar material fresado, sabendo-se que este possui pouco material passante na peneira # 40 (6,42%), esperava-se que a plasticidade reduzisse mais; os resultados mostraram que os teores de material fresado ainda não contribuíram na redução considerável do IP em relação ao solo puro. Assim, os limites de Atterberg estão sendo influenciados pelo carácter plástico do solo presente nas misturas.

Para as densidades reais dos grãos (D₂₀) observa-se que ao adicionar o material fresado ocorre uma diminuição. Isso pode estar associado à baixa densidade obtida do material fresado (2,26).

A Figura 2 apresenta as curvas de compactação do solo puro e das misturas % solo % material fresado. Ao observar o comportamento das curvas, nota-se um aumento na massa específica aparente seca à medida que há um acréscimo de material fresado. Entretanto, a umidade ótima diminui. Isso ocorre devido à diminuição da quantidade de solo na amostra, pois tal redução resulta em uma menor quantidade de partículas que absorvem água. Contribui nessa redução de umidade, a



baixa absorção por parte dos grãos que compõem o material fresado, sendo este o responsável pelo aumento na massa específica.

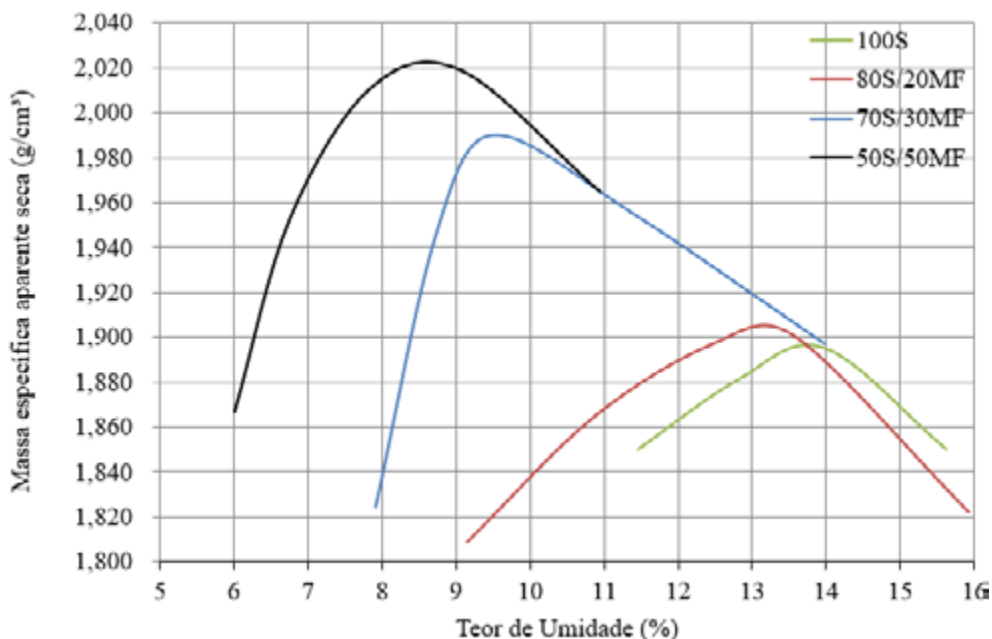


Figura 2. Curvas de compactação do solo e misturas % solo % MF (AUTOR, 2024).

A Figura 3 apresenta as médias das resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral das misturas contendo solo, teores de material fresado e 5% de cimento Portland.

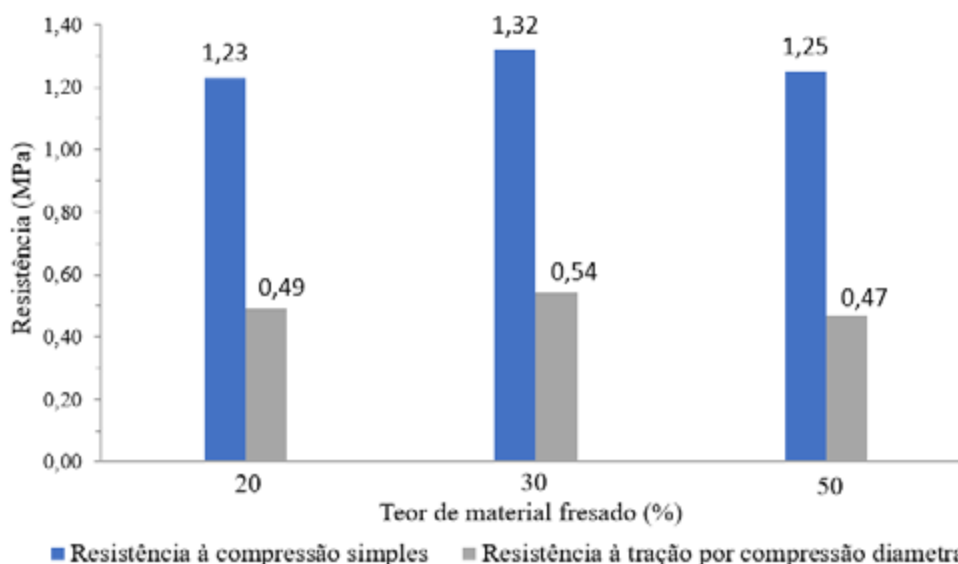


Figura 3. Resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral das misturas solo, material fresado e 5% de cimento Portland (AUTOR, 2024).



DOI: [10.29327/1430212.49-21](https://doi.org/10.29327/1430212.49-21)

ANÁLISE DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS EM MISTURAS DE RAP, SOLO ARGILOSO E CIMENTO PORTLAND

Observa-se que há um aumento da resistência à compressão para 30% de fresado, em seguida ocorre uma redução. Tal aumento pode estar relacionado à melhoria da granulometria e da plasticidade para esta mistura. Porém, a redução da resistência para o teor de 50% de fresado pode estar associado ao excesso de material coberto por asfalto, além da dificuldade de se manter um corpo de prova uniforme e regular ao ser moldado neste teor de material fresado.

Tomando-se como base a norma solo-cimento para base, segundo DNIT-ES 143, a resistência à compressão para solo-cimento deve ser 2,1 MPa. Portanto, as misturas testadas aqui nesta pesquisa não apresentaram valores desta magnitude. Entretanto, vale destacar que solo-cimento e solo, material fresado e cimento são misturas diferentes, sendo esta última mais heterogênea. É possível chegar a valores dessa resistência para as misturas com material fresado se aumentar o teor de cimento. Porém, torna-se economicamente inviável uma vez que o aditivo é o material mais caro da mistura.

Da Figura 3, também se observa que a resistência à tração tem o maior valor para a mistura com 30% de material fresado, em seguida ocorre uma redução. Este comportamento pode estar relacionado a uma melhoria no entrosamento entre os grãos, além da união que o 5% de cimento proporcionou aos grãos desta mistura. Para o teor de 50% de fresado, ocorre uma queda na resistência explicada pela maior quantidade de material fresado dificultando aquele entrosamento entre grãos, sendo necessários maiores teores de cimento para garantir maior resistência.

Ao comparar as resistências à compressão e à tração, nota-se que a tração representou cerca de 40%, 41% e 38% da resistência à compressão para os teores de 20, 30 e 50% de fresado, respectivamente. Tais relações são superiores aquela apresentada por Ingles e Metcalf (1972) de 10%. Vale destacar que, assim como ocorreu na moldagem dos corpos de prova à compressão, a moldagem à tração, para o teor de 50% de fresado, teve-se a mesma dificuldade em manter um corpo de prova uniforme e regular.

Silva et al. (2018) estudaram misturas envolvendo RAP, pó de pedra e acrescido 6% de cimento CP IV-32. As amostras compreenderam misturas com variações de 20% de fresado. Os autores observaram um aumento linear de resistência à compressão e à tração, com o aumento do tempo de cura. Em todas as misturas, a resistência à compressão de 2,1 MPa foi atingida. Porém, as misturas contendo 100% de pó de pedra e 100% de fresado não se enquadraram nas faixas granulométricas de trabalho. Os autores concluem descrevendo que as misturas 80F20P e 60F40P apresentaram os melhores resultados.

CONCLUSÃO

O programa laboratorial apresentado comprova, em partes, a hipótese formulada, uma vez que teores de material fresado alterou algumas das propriedades geotécnicas. Assim, foi possível concluir que a adição do concreto asfáltico fresado aumentou o teor de pedregulho, diminuiu o teor da fração fina e pouco variou a fração areia.

Os limites de Atterberg sofrem alterações fazendo diminuir o índice de plasticidade. A densidade real dos grãos diminuiu influenciada pela menor densidade do fresado. A classificação do solo não sofreu modificação no nome do grupo.

As curvas de compactação apresentaram o comportamento de aumentar a massa específica seca máxima com redução da umidade ótima, influenciadas pelo aumento do material fresado.

Das misturas com a adição de 5% de CP V-ARI, aquela com 30% de material fresado foi a que apresentou maior valor de resistência à compressão e à tração. No entanto, das misturas analisadas,



nenhuma delas atenderiam a todos os requisitos estabelecidos por normas técnicas. Porém, foi possível obter um novo material com propriedades geotécnicas melhores em relação ao solo puro e ao fresado.

Por conseguinte, o novo material pode ser trabalhado e ajustado, segundo os critérios normativos, propondo-se ser um material aplicável em obras geotécnicas com alto consumo de material, a exemplo da pavimentação. Como consequência, tem-se o aproveitamento de um resíduo oriundo da fresagem da camada asfáltica, redução na extração de solo natural na jazida e diminuição do transporte dos materiais.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Pesquisa (Copes), Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GeoPav) e ao Laboratório de Materiais de Construção e Estrutura (LAMCE) da Universidade Federal de Sergipe pela realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alhaji, M. M.; Alhassan, M. Effect of reclaimed asphalt pavement stabilization on the microstructure and strength of Black Cotton Soil. *International Journal of Technology*, Depok, Indonésia, v. 9, n. 4, p. 727-736, 2018.
- Alhaji, M. M. et al. Laboratory and field evaluation of A-6 lateritic soil treated with reclaimed asphalt pavement and ordinary Portland cement. *International Journal of GEOMATE*, Tsu, Mie, Japão, v. 17, n. 63, p. 360-370, 2019.
- Bernucci L. B. et al. *Pavimentação asfáltica. Formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA, 2006. 501 p.
- Bonfim, V. *Fresagem de pavimentos asfálticos*. 3.ed. São Paulo: Exceção Editorial, 2007.
- Cruz, M.L.S.; Jalali, S. Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento. *Revista Luso-Brasileira de Geotecnia*, Portugal, n. 120, p. 49-64, nov.2010.
- Das, B.M. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. 6 ed. Tradução All Tasks; revisão técnica Pérsio Leister de Almeida Barros. São Paulo: Thomson Learning, 2007.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER-ME 041: solo: preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER-ME 051: solos: análise granulométrica. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER-ME 082: solos: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER-ME 093: solos: determinação da densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER-ME 122: solos: determinação do limite de liquidez: método de referência e método expedito. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER-ME 162: solos: ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER-ME 201: solo-cimento: compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: DNER, 1994.



DOI: [10.29327/1430212.49-21](https://doi.org/10.29327/1430212.49-21)

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS EM MISTURAS DE RAP,
SOLO ARGILOSO E CIMENTO PORTLAND**

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT-ME 412: pavimentação: misturas asfálticas: análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento: método de ensaio. Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 2019.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT-ME 136: pavimentação asfáltica: misturas asfálticas: determinação da resistência à tração por compressão diametral: método de ensaio. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 2018.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. DNIT-ES 143: pavimentação - base de solo-cimento – Especificação de serviço. Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 2022.

Ingles, O.G.; Metcalf, J.B. Soil stabilization – principles and practice. New York: John Wiley & Sons. 1972.

Kamel, M. A.; Al-Bustami, N. M.; Alsulami, B. T. Evaluation of the suitability of recycled asphalt pavement (RAP) for subbases. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Madhya Pradesh, Índia, v. 6, n. 5, p. 212-215, 2016.

Little, D.N. Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. 1995, 219 p. Disponível em: <http://www.limetexas.org/publications/txt_56741_4o.pdf>. Acesso em 15 ago. 2022.

Senço, W. Manual de técnica de pavimentação. 1.ed. Volume 2. São Paulo: Pini, 2001. 671 p.

Silva, M.R. et al. Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com emprego em camada de pavimento. Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, v. 5, n. 1, p. 20-31, jan-jun., 2018. ISSN 2358-6508. DOI:<https://doi.org/10.18256/2358-6508.2018v5il.2079>.



AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS SOLO-RAP PELO ENSAIO DE MULTIESTÁGIOS

Isabela de Jesus Santos¹; Mario Sergio de Souza Almeida²; Acbal Rucas Andrade Achy²; Weiner Gustavo Silva Costa²; Mateus Ribeiro Caetano³ & Gisandra Faria de Paula³

RESUMO

Quando um veículo passa sobre o pavimento, ele aplica uma carga na superfície que induz estados de tensões ao longo da profundidade das camadas desta estrutura. No entanto, o estado de tensão gerado em cada ponto das camadas geotécnicas do pavimento promove a ocorrência de deslocamentos, em que parcela deles se tornarão deformações permanentes, especialmente no caso do tráfego, onde as cargas são aplicadas repetidamente ao longo do tempo. Desta forma, torna-se crucial a realização do ensaio de deformação permanente em laboratório, com o objetivo de prever o comportamento dos materiais em campo e, assim, avaliá-los quanto à sua deformabilidade plástica. Diante disto, este trabalho tem por objetivo analisar a deformação permanente determinada com uso da metodologia de ensaios cíclicos do tipo *Repeated Load Triaxial* (RLT), conhecido como multiestágio, em misturas de solo com *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), nos teores de 50% e 80% de RAP. O programa experimental realizado em laboratório consistiu na realização dos ensaios de caracterização geotécnica, mini-MCV e perda de massa por imersão, além dos ensaios dinâmicos de deformação permanente pelo método RLT. Os resultados demonstraram que o RLT é promissor para a seleção de materiais utilizados em pavimentação, carecendo de um maior número de testes comparativos para sua validação.

PALAVRAS-CHAVE: Deformação permanente; Ensaio dinâmico; Multiestágio; Solo-RAP.

ABSTRACT

When a vehicle passes over the pavement, it applies a load to the surface that induces stress states throughout the depth of the pavement layers. However, the stress state generated at each point of the geotechnical layers promotes the occurrence of displacements, some of which will become permanent deformations, especially in the case of traffic, where loads are repeatedly applied over time. Thus, it becomes crucial to conduct permanent deformation tests in the laboratory in order to predict the behavior of materials in the field and, consequently, classify them according to their deformability. In other words, the laboratory procedure aims to assess the ability of a material to withstand permanent deformation under the traffic loads throughout the pavement's lifespan. Therefore, this study aims to evaluate the permanent deformation determined using the cyclic testing methodology known as *Repeated Load Triaxial* (RLT), also known as multi-stage, on soil mixtures with *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) at 50% and 80% RAP contents. The experimental program conducted in the laboratory consisted of geotechnical characterization tests, mini-MCV tests, immersion loss tests, and dynamic permanent deformation tests using the RLT method. The results demonstrated that RLT shows promise for selecting materials used in pavement construction, although further comparative testing is needed for validation.

KEY WORDS: Deformability; Dynamic tests; Soil-RAP.

¹ Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: isabela@aluno.ufrb.edu.br.

² Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, e-mail: mario.almeida@ufrb.edu.br; acbal@ufrb.edu.br; weiner@ufrb.edu.br.

³ Universidade de Brasília, e-mail: mateusribeirocaetano@gmail.com; gisandrafp@gmail.com.



DOI: [10.29327/1430212.49-53](https://doi.org/10.29327/1430212.49-53)

AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS SOLORAP PELO ENSAIO DE MULTIESTÁGIOS

INTRODUÇÃO

Ao longo da sua vida útil, o pavimento é exposto a diversos ciclos de cargas, resultando no surgimento de patologias. No Brasil, comumente são encontrados danos no pavimento asfáltico por fadiga que é causada principalmente pelas solicitações repetidas do tráfego, proporcionando o aparecimento de trincas no revestimento, e a deformação permanente que ocorre quando há uma deformação plástica nas camadas do pavimento, podendo gerar depressões ou ondulações, conhecidas como afundamento de trilha de roda (ATR) (GUABIROBA *et al.*, 2023).

No dimensionamento de pavimentos asfálticos, muitas vezes, há uma ênfase considerável na análise da fadiga, enquanto mecanismos de degradação, como ATR, são frequentemente subestimados.

A introdução do novo Método de Dimensionamento Nacional Mecânico-Empírico (MeDiNa), que emprega dados experimentais, tem gerado uma demanda mais significativa pela realização dos ensaios dinâmicos como o de deformação permanente (DP). Este ensaio, focado em testes triaxiais de carga repetida, tornou-se essencial para o dimensionamento adequado do pavimento flexível. (SANTOS; SILVA; GUIMARÃES, 2021).

Em 2018, foi criada no Brasil a norma DNIT179-IE (DNIT, 2018), que descreve detalhadamente o método de ensaio de DP, como também estabelece critério para verificação do acomodamento destas deformações (*shakedown*).

Esta norma especifica a aplicação de, no mínimo, 150.000 ciclos de cargas para cada corpo de prova (CP), em 9 diferentes pares de tensões. Além disto, a frequência de aplicação de cargas recomendada na norma é de 2 Hz (120 ciclos por minuto), podendo ser utilizada frequência de 1 até 5 Hz, ajustando somente o intervalo de repouso com duração do pulso de carga para qualquer frequência de 0,1 segundo.

No entanto, este ensaio demanda um extenso período de tempo, mão de obra e uma grande quantidade de material, o que torna o procedimento pouco eficiente. No âmbito internacional, alguns países já consideram a otimização deste processo com a realização do ensaio em multiestágios, ou seja, com a utilização de um único CP para aplicação de diferentes pares de tensões, variando o número de ciclos (CABRAL *et al.*, 2021).

Na norma europeia EN 13286-7 (CEN, 2004), é prevista a utilização do equipamento de ensaio triaxial de carga repetida em múltiplos estágios (RLT – *Repeated Load Triaxial Tests*), o que possibilita uma avaliação rápida da deformação permanente causada por carregamentos cíclicos de diferentes magnitudes, realizados em um único CP. Já a norma neozelandesa NZTA T15:2014 (NZTA, 2014) define a aplicação de seis estados de tensões, permitindo a realização de até 50.000 ciclos de carregamento para cada par de tensões especificado.

Ao longo dos anos, diversos estudos vêm buscando otimizar o ensaio de deformação permanente utilizando o método RLT, como os autores Song (2010); Erlingsson e Ramhan (2013); Khasawneh (2020); Li *et al.* (2021); Maghool *et al.* (2022); Ben *et al.* (2023) e Caetano (2024).

Cabral *et al.* (2022) avaliaram dois tipos de solos distintos e uma mistura solo-brita, oriundos da microrregião de Mossoró, situada no estado do Rio Grande do Norte (RN), Brasil. Os autores realizaram o ensaio RLT com a aplicação de 10.000 ciclos de carregamentos, em frequência de 2 Hz e chegaram à conclusão de que a abordagem metodológica dos ensaios triaxiais com cargas repetidas em múltiplos estágios demonstrou ser eficaz na determinação dos valores da DP dos materiais investigados.

Nessa linha o presente estudo teve por objetivo avaliar de forma comparativa o comportamento de deformação permanente de misturas de um solo com *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), nos teores



de 50% e 80% de RAP, por meio de ensaio de deformação permanente realizados em múltiplos estágios.

MATERIAIS E MÉTODOS

Após a realização da coleta das amostras, o programa experimental constituiu-se da realização de ensaios de caracterização geotécnica, mini MCV e perda de massa por imersão (PI), ensaios de compactação e moldagem de corpos de prova (CP), nos parâmetros ótimos da energia Proctor intermediária, para realização de ensaios dinâmicos em multiestágio adaptado da NZTA T15:2014 (NZTA, 2014), em misturas solo-RAP, em teores de 50% e 80% de RAP. Com essas informações, buscou-se avaliar o comportamento desses materiais, de forma comparativa, em relação à deformação permanente sob as diretrizes da metodologia testada.

Local de coleta e caracterização geotécnica das amostras

O solo do presente estudo é um argiloso residual do granulito-gnaiss, aqui nomeado Regolito, coletado na área da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA), em Salvador, Bahia.

Posteriormente, para realização da caracterização geotécnica do solo, foram realizados os ensaios de granulometria por peneiramento DNER 080-ME (DNER, 1994), limite de liquidez DNER 122-ME (DNER, 1994), limite de plasticidade DNER 082-ME (DNER, 1994) e densidade real DNER 093-ME (DNER, 1994). O solo foi devidamente preparado para cada ensaio de acordo com o DNER 041-ME (1994). Além disto, foram realizados ensaios para classificação pela metodologia MCT (Miniatura, Compactada, Tropical), DNIT 258-ME (DNIT, 2023) e DNIT 259-CLA (DNIT, 2023). Os resultados de granulometria e limites de consistência também permitiram classificar o solo no método TRB.

O RAP utilizado no presente estudo é oriundo dos serviços de fresagem do revestimento primário da BR 101/BA, coletado durante a obra de restauração de segmento da rodovia.

Devido à heterogeneidade presente na formação do RAP, utilizou-se o material passante na peneira $\frac{3}{4}$ " (19,1mm). A caracterização deste material teve início com o ensaio de granulometria DNER 083-ME (DNER, 1998) e densidade real DNER 081-ME (DNER, 1998).

Foram testadas as misturas de solo-RAP, nos percentuais com 50% de RAP e 50% de Regolito e com 80% de RAP e 20% de Regolito, calculados em relação a massa seca da mistura. De posse dos resultados da granulometria por peneiramento do solo e do RAP, individualmente, foram determinadas as granulometrias das misturas, considerando os percentuais de cada material (solo e RAP) nas diferentes misturas. Além disso, utilizou-se os valores percentuais do material passante na peneira #40, obtido da caracterização das amostras do solo e do RAP, em relação ao percentual de cada mistura, para realização dos ensaios de limite de liquidez DNER 122-ME (DNER, 1994) e limite de plasticidade, DNER 082-ME (DNER, 1994). As porcentagens das misturas estão ilustradas na Figura 1.

Os ensaios de compactação das amostras para determinação da curva de compactação para obtenção da umidade ótima (w_{ot}) e massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$) de cada amostra foram realizados conforme a norma DNIT 443-ME (DNIT, 2023), na energia Proctor intermediária (12,8 kg.cm/cm³).



DOI: 10.29327/1430212.49-53

AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS SOLORAP PELO ENSAIO DE MULTIESTÁGIOS



(a) 50% de solo e 50% de RAP

(b) 20% de solo e 80% de RAP

Figura 1 – Ilustração das porcentagens das misturas utilizadas.

Deformação Permanente Multiestágio (RLT)

A metodologia DP convencional, estabelecida pela norma DNIT 179-IE (DNIT, 2018), demanda uma rotina de ensaios com duração aproximada de 9 dias, considerando a execução do ensaio por amostra na frequência máxima permitida de 5Hz, tornando o ensaio excessivamente moroso, além da elevada quantidade de material necessário para moldagem dos 9 CP. Neste sentido, utilizou-se o método de ensaio triaxial de carga repetida RLT, adaptado da NZTA T15:2014 (NZTA, 2014).

Este método foi avaliado de forma a permitir uma rápida avaliação da DP gerada por cargas cíclicas de diferentes magnitudes. Essa adaptação consistiu ensaiar um CP com aplicação da primeira tensão confinante (σ_3) prevista na DNIT 179-IE (DNIT, 2018), aplicando-se nele os três níveis de tensão desvio (σ_d) respectivos, previstos nesta mesma norma, de forma consecutiva, e 50.000 ciclos para cada uma das tensões desvio aplicadas. Repete-se este procedimento em dois outros CP, para o segundo e terceiro níveis de tensão confinante da DNIT 79-IE (DNIT, 2018). Isto reduz o número de CP necessários de 9 para 3, bem como de tempo total necessário para realização do ensaio de DP de 9 para 3 dias, fruto também da redução do número de ciclos de carga de 150.000 para 50.000. Assim, foram adaptadas as sequências de tensões σ_3 e σ_d estabelecidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estados de tensões indicados para determinação da deformação permanente. Adaptado DNIT 179-IE (DNIT, 2018).

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	
0,040	0,040	2
	0,080	3
	0,120	4
0,080	0,080	2
	0,160	3
	0,240	4
0,120	0,120	2
	0,240	3
	0,360	4

O processo de preparação de cada CP segue, nesta metodologia, as mesmas orientações contidas na DNIT 179-IE (DNIT, 2018). Sendo assim, após a etapa de compactação, cada CP foi levado para o



Isabela de Jesus Santos, Mario Sergio de Souza Almeida,
Acbal Rucas Andrade Achy, Weiner Gustavo Silva Costa,
Mateus Ribeiro Caetano & Gisandra Faria de Paula

equipamento triaxial de carga repetida (Figura 2), para determinação da deformação permanente de cada amostra. Cabe destacar que o estágio de acomodação, previsto na DNIT 179-IE (DNIT, 2018), correspondendo a σ_3 e σ_d da ordem de 0,030 MPa, foi aplicado em cada CP apenas uma vez, antes do início do ensaio de DP propriamente dito em cada um deles. Todos os testes foram realizados na frequência de 5 Hz.



(a) Compactação do CP



(b) CP moldado



(c) CP no equipamento triaxial

Figura 2 – Procedimento da moldagem do Corpo de Prova.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização das amostras

Na Tabela 2, são apresentados os resultados de granulometria, LL, LP, IP, densidade real dos grãos (ρ_s), parâmetros ótimos de compactação (w_{ot} e $\rho_{dm\acute{a}x}$), e as classificações AASHTO e MCT do solo.

Tabela 2 – Caracterização do solo.

Parâmetros	Resultados
LL (%)	89
LP (%)	49
IP (%)	40
ρ_s (g/cm ³)	2,73
w_{ot} (%)	29,32
$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	1,47
AASHTO	A-7-5
Pi (%)	55
Classificação MCT	LG'

Observa-se, dos resultados apresentados na Tabela 2, tratar-se de um solo A-7-5 e, portanto, argiloso, não adequado, de acordo com a TRB, para utilização em subleito por ser um solo fino e altamente plástico, sujeito, portanto, a elevadas variações de volume.

Entretanto, pela metodologia MCT, o material foi classificado como LG', solo tipicamente argiloso, de comportamento laterítico, adequado para utilização em obras rodoviárias, sobretudo no subleito.



DOI: 10.29327/1430212.49-53

**AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS SOLORAP
PELO ENSAIO DE MULTIESTÁGIOS**

Na Tabela 3, têm-se os resultados dos ensaios de caracterização do RAP, relativos à granulometria, densidade real, compactação e plasticidade (IP).

Tabela 3 – Caracterização do RAP.

Parâmetros	Resultados
ρ_s (g/cm ³)	2,45
w _{ot} (%)	6,18
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,83
IP (%)	NP

Analisando-se a Tabela 3, observa-se que a massa específica aparente seca máxima alcançada pelo RAP, na energia intermediária, é menor que a apresentada no solo (Tabela 2).

Os resultados de granulometria do solo, do RAP e das misturas, além do respectivo enquadramento nas faixas granulométricas para uso em camada de base, conforme estabelece a DNIT 141-ES (DNIT, 2022), estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado da granulometria das amostras e faixas granulométricas. Fonte: DNIT 141-ES (DNIT, 2022).

Misturas	Peneiras							Faixa DNIT
	2"	1"	3/8"	4	10	40	200	
% Passante								
Solo	100	100	98,58	97,89	96,80	86,46	73,62	-
50% RAP	100	100	87,98	73,00	60,60	46,65	37,16	-
80% RAP	100	100	81,62	58,06	38,89	22,76	15,28	C
100% RAP	100	100	77,38	48,10	24,40	6,83	0,70	-

Ao avaliar os resultados da granulometria do solo, RAP e misturas da Tabela 4, nota-se a existência de uma predominância de finos na composição do solo, com valor da ordem de 73,62% passante na peneira #200, ao passo que o RAP se apresenta como material granular, com apenas 0,70% passante nesta mesma peneira. Considerando-se a DNIT 141-ES (DNIT, 2022), a mistura de 80% enquadra-se para uso como camada de base, devidamente enquadrada na faixa C.

Na Tabela 5, são apresentados os resultados da caracterização geotécnica das misturas, onde é possível observar uma tendência de crescimento da massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dmáx}$), com o aumento do teor de RAP nas misturas de 50% e 80%, da ordem de 1,76 g/cm³ e 1,97 g/cm³, respectivamente. Em relação ao teor de umidade ótima (w_{ot}), entretanto, houve uma tendência de diminuição de 16,30% com 50% de RAP para 9,9% com 80% de RAP. Esta constatação corrobora com o aumento da densidade observado, indicando que os vazios da mistura solo-RAP estão sendo reduzidos e, por conseguinte, aumentando a capacidade de suporte. Este comportamento mostra-se coerente com os estudos efetuados por Alhaji e Alhassan (2018).

Tabela 5 – Caracterização das misturas.

Misturas	w _{ot} (%)	$\rho_{dmáx}$ (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo	29,32	1,47	89	49	40
50% RAP	16,30	1,76	83	47	36
80% RAP	9,90	1,97	65	34	31
100% RAP	6,18	1,83	-	-	NP



Isabela de Jesus Santos, Mario Sergio de Souza Almeida,
 Acbal Rucas Andrade Achy, Weiner Gustavo Silva Costa,
 Mateus Ribeiro Caetano & Gisandra Faria de Paula

Deformação Permanente

Na Figura 3, são apresentadas as curvas de deformação permanente acumulada dos ensaios de RLT. Pode-se observar que, dentre as duas amostras avaliadas, a mistura com 50% de RAP apresentou valores de deformação menores em relação à mistura com 80% de RAP com exceção do par de tensões 120 x 360 kPa. Isso pode ser melhor observado na Figura 4, onde são apresentados os deslocamentos permanentes após 50.000 ciclos de carregamentos de cada ensaio de DP. Na literatura, alguns trabalhos envolvendo deformação permanente em misturas solo-RAP foram realizados, tais como Lima *et al.* (2023), em que observaram a diminuição no valor de DP com o aumento do teor do RAP até 50% apenas nas misturas.

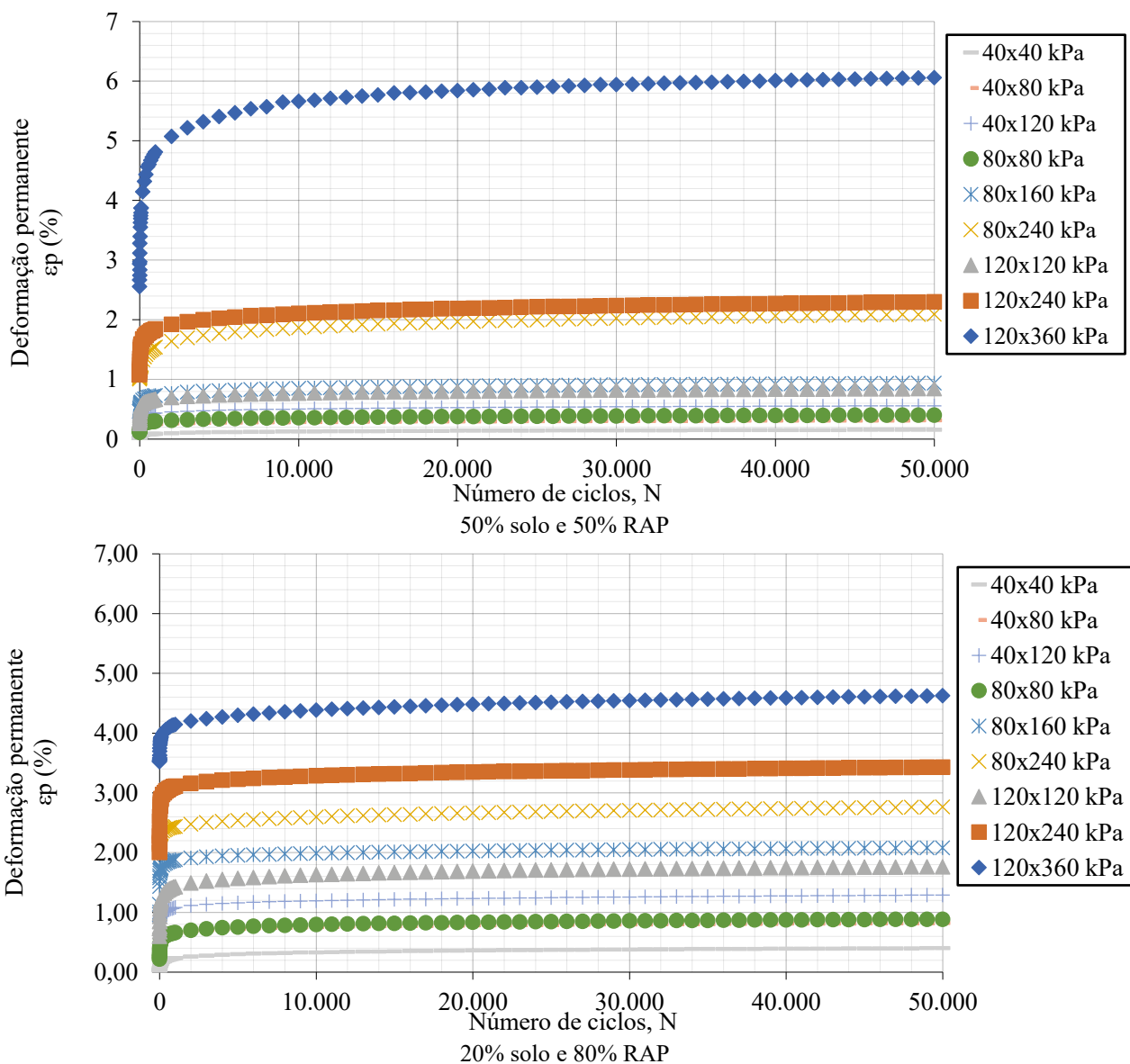


Figura 3 – Deformação permanente das amostras.



DOI: 10.29327/1430212.49-53

AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS SOLORAP PELO ENSAIO DE MULTIESTÁGIOS

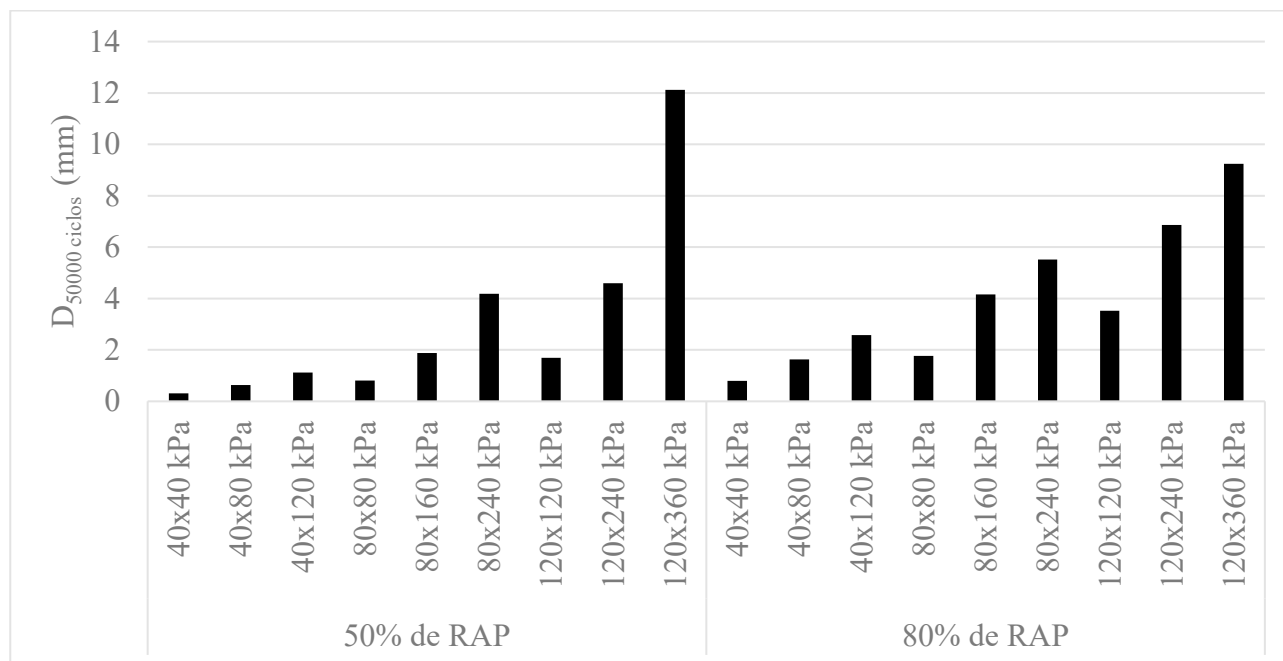


Figura 4 – Deslocamentos permanentes dos CP nos ensaios de DP RLT.

Teoria *Shakedown*

Com o intuito de verificar graficamente a estabilização da plastificação após um determinado número de ciclos de aplicação de cargas na mistura (*shakedown*), é apresentada, na Figura 5, a análise de *shakedown* realizada nas misturas em estudo, prevista na DNIT 179-IE (DNIT, 2018), obtidas a partir dos ensaios de DP RLT. Nos quais são apresentados a DP total no eixo das abscissas e a taxa de acréscimo desta deformação no eixo das ordenadas. Diz-se que um solo/mistura de solo apresenta *shakedown* quando esta taxa de acréscimo é da ordem de 1×10^{-7} metros.

Observa-se que, para a mistura composta por 50% de RAP, o comportamento de acomodação da mistura exibe dois aspectos principais. O primeiro aspecto, evidenciado no par de tensões de 120 x 360 kPa, revela um comportamento tipo AB, caracterizado por deformações iniciais significativas seguidas, no presente caso, por uma tendência de acomodação plástica. O segundo aspecto refere-se aos demais pares de tensões que exibiram um comportamento tipo A, demonstrando acomodamento plástico conforme definido na norma DNIT 179-IE (DNIT, 2018). Neste contexto, é perceptível que a redução dos ciclos de carregamento apenas restringiu a extensão da visualização da taxa de aumento de DP. Por outro lado, na mistura composta por 80% de RAP todos os pares de tensões apresentaram uma tendência ao comportamento tipo A.

Ao final dos ensaios, estes não atingiram a taxa de deformação exigida em norma para o acomodamento plástico do solo/mistura (1×10^{-7} m).



Isabela de Jesus Santos, Mario Sergio de Souza Almeida,
Acbal Rucas Andrade Achy, Weiner Gustavo Silva Costa,
Mateus Ribeiro Caetano & Gisandra Faria de Paula

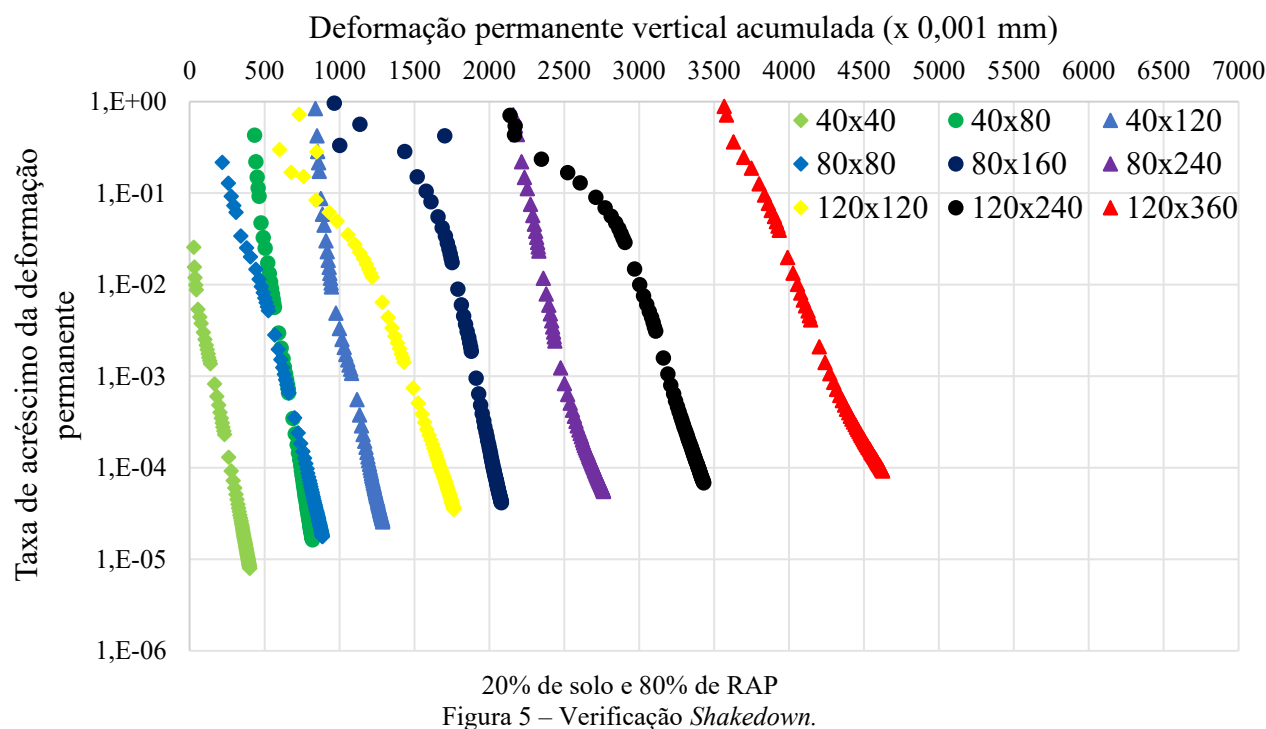
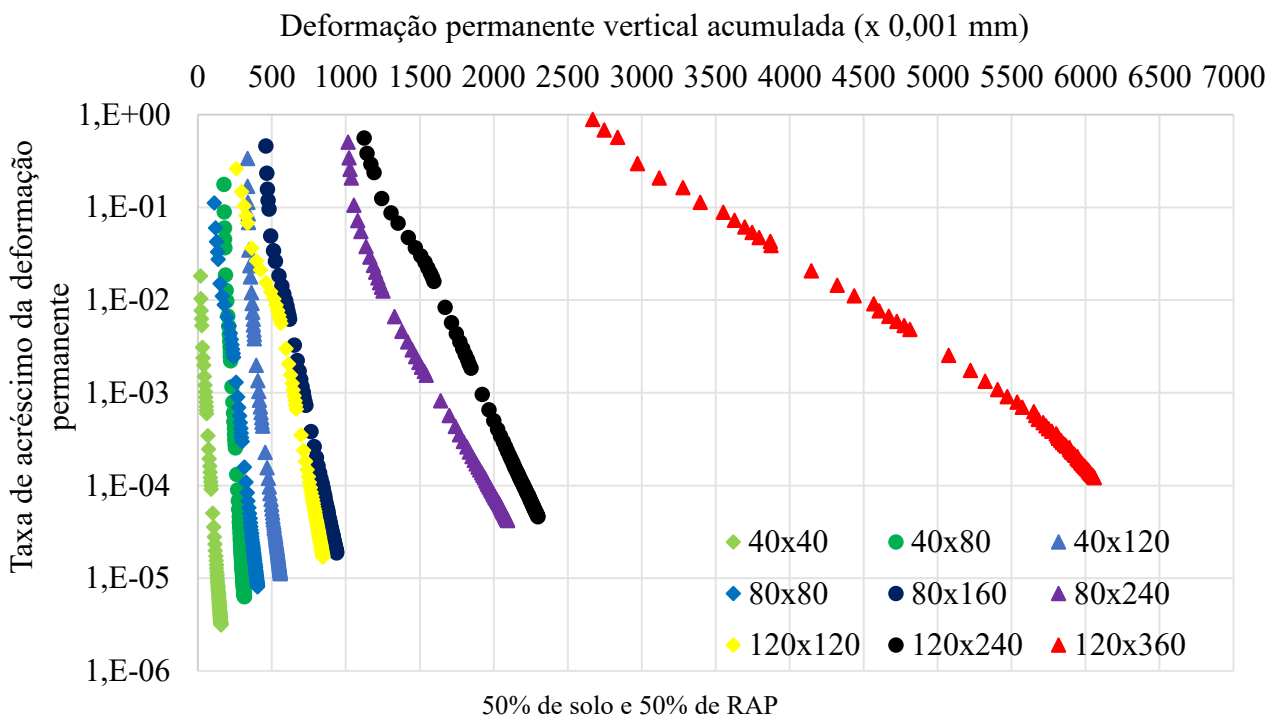


Figura 5 – Verificação *Shakedown*.



DOI: [10.29327/1430212.49-53](https://doi.org/10.29327/1430212.49-53)

AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS SOLORAP PELO ENSAIO DE MULTIESTÁGIOS

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensaio em múltiplos estágios permite acompanhar como os solos e suas misturas se comportam sob cargas acumuladas em diferentes níveis de tensões, simulando a variação de carregamento do tráfego real que ocorre nas vias.

Os resultados demonstraram em termos de deformação permanente, a mistura com 50% de RAP apresentou menores valores de deformação em comparação com a mistura com 80% de RAP, exceto sob o par de tensões 120 x 360 kPa.

As misturas de solo analisadas não apresentaram *shakedown*, pois, ao final dos ensaios, não atingiram a taxa de deformação exigida pela norma para o acomodamento plástico (1×10^{-7} m).

O uso do método RLT testado demonstrou ser promissor para a seleção de materiais utilizados em pavimentação, embora somente a realização de um número maior de testes com materiais de granulometrias diversas, utilizando também a metodologia convencional de realização de ensaio de DP para comparação DNIT 179-IE (DNIT,2018), permitirá uma melhor avaliação sobre a abrangência e acurácia de seu uso.

É vital pesquisar alternativas e metodologias mais eficazes que possam potencializar o processo do ensaio de DP na predição do comportamento dos materiais avaliados sem comprometer a qualidade e precisão das análises de pavimentos. Ao adotar metodologias que incorporam multiestágios, é essencial conduzir uma investigação criteriosa sobre como as tensões influenciam a deformabilidade do material, seu comportamento durante a aplicação de cargas variadas e o fenômeno do *shakedown*.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Pavimentação da UFRB e a UFRB pelo apoio para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALHAJI, M.M. & ALHASSAN, M. Effect of Reclaimed Asphalt Pavement Stabilization on the Microstructure and Strength of Black Cotton Soil. *International Journal of Technology*, 4: 727-736, 2018.

BEN, L. H. F. *et al.* Deformação Permanente de Solo Argiloso Laterítico por Meio da Metodologia Multiestágios. Em *Anais da Conferência RAPV/Enacor 2023*. DOI: 10.29327/1304307.48-8, 2023.

CABRAL, W. S.; BARROSO, S. H. de A.; SILVA, S. de A. T. Consideração da deformação permanente de solos ocorridos na região nordeste na análise mecânica-empírica de pavimentos. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, p. e13096, 2022.

CABRAL, W. S. Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da Microregião de Mossoró/RN. 2021. 181f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2021.

CAETANO, M. R. . Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Tropicais e Materiais Britados de Pavimentos Rodoviários do Distrito Federal e do Estado de Roraima. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, DF, 2024. 264 p.

CEN - European Committee for Standardization. EN 13286-7: Unbound and Hydraulically Bound Mixtures. Part 7: Cyclic Load Triaxial Tests for Unbound Mixtures. *European Stanemrem EN*. Brussels, Belgium, 2004.

DOS SANTOS, J. T. A.; DA SILVA, P. A. L.; GUIMARÃES, A. C. R. Determinação da incerteza de medição nos ensaios de deformação permanente de solos lateríticos. *TRANSPORTES*, v. 30, n. 2, p. 2678-2678, 2022.



Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 041/94 ME - Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 4 p., 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 080/94 ME - Solos – análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 4 p., 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 081/98 ME: Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 6 p., 1998.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem DNER-ME 082/94. Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3p., 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 083/98 ME - Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 5 p., 1998.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 093/94 ME: Solo – Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro, 4 p., 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). DNER-ME 122/94. Solos - Determinação do limite de liquidez- método de referência. Rio de Janeiro, 7p., 1994.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 141/2022 –S - Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 9 p., 2022.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 179/2018 – IE. – Pavimentação Solos Determinação da deformação permanente. Brasília - DF, 17 p., 2018.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 258/2023 – ME. – Compactação em equipamento miniatura – Ensaios Mini-MCV e perda de massa por imersão. Brasília - DF, 22 p., 2023.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 259/2023 – CL–. Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura. Brasília - DF, 8 p., 2023.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 443/2023 ME – Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos. Brasília-DF, 12 p., 2023.

ERLINGSSON, S., RAHMAN, M. S. Evaluation of pavement deformation characteristics of unbound granular materials by means of multistage repeated load triaxial tests. Journal of the 254 Transportation Research Board, No. 2369, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 11-19 p., 2013.

GUABIROBA, J. V. de Oliveira C. *et al.* Estudo da Fadiga e da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Produzidas em Goiás. Matéria (Rio de Janeiro), v. 28, p. e13232, 2023.

KHASAWNEH, M. A. Permanent deformation behavior of cohesive subgrade soils classified as ^a-4a and ^a-6a. Materials Today: Proceedings, 33, 1762–1768. doi:10.1016/j.matpr.2020.04.875, 2020.

LI, Yafeng *et al.* Dynamic behaviors of fine-grained subgrade soil under single-stage and multi-stage pavements under cyclic loading: Permanent deformation and its prediction model. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 142, p. 106548, 2021.

LIMA, L. B. F. *et al.* Investigation of resilient modulus and permanent deformation of tropical soil with Reclaimed Asphalt Pavement. Transportation Geotechnics, v. 43, p. 101103, 2023.

MAGHOOL, F. *et al.* Strength and permanent deformation properties of demolition wastes, glass, and plastics stabilized with foamed bitumen for pavement bases. Construction and Building Materials, v. 320, 126108 p., 2022.

NZTA T15. Specification for Repeated Load Triaxial (RLT) Testing for Pavement Materials. New Zealand Transport Agency (NZTA), Wellington, New Zealand. 2014.

SONG, Y., O. P. S. K. Interpretation of Shakedown Limit from Multistage Permanent Deformation Test. Transportation Research Record. 2167, 72-82, 2010.



O USO DO RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO (RPA) NA ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS GEOTECNICAS DE PAVIMENTOS

João Paulo Arruda Sewaybricker¹ & Caroline Dias Amancio de Lima¹

RESUMO

A pavimentação é um processo que consome consideráveis recursos naturais, gera resíduos significativos e amplifica as emissões de gases de efeito estufa. A inserção de Reciclado de Pavimento ASFáltico (RPA) nas camadas de base e sub-base surge como uma alternativa sustentável, com potencial para reduzir custos e diminuir a necessidade de novos materiais. No contexto brasileiro, apesar das iniciativas promovidas por órgãos como o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), ainda existe uma carência de referências quanto à utilização do RPA. Este, por sua vez, representa uma alternativa capaz de substituir agregados e aprimorar as propriedades, por meio do processo conhecido como estabilização granulométrica, sendo sua aplicação guiada por aspectos econômicos, logísticos e qualitativos da mistura. O desempenho adequado das estruturas de pavimentação está diretamente ligado à avaliação das propriedades mecânicas dos materiais constituintes, tais como a densidade, umidade ideal, Índice de Suporte Califórnia (ISC), permeabilidade, módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP). O comportamento das misturas é influenciado pelo teor de RPA empregado, bem como pelas características mecânicas do próprio RPA e do solo ou agregado utilizados. Embora as pesquisas destaquem os benefícios da incorporação do RPA, existe uma demanda por padronizações técnicas mais sólidas e por dados adicionais no contexto brasileiro em relação à sua aplicação. Portanto, o presente artigo tem como objetivo contribuir ao abordar de forma resumida as informações referentes a normas nacionais, custos, melhores práticas, experiências internacionais e estudos correlatos acerca da utilização do RPA nas camadas subjacentes ao revestimento.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação; Especificações de Serviços; Técnicas Construtivas; Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

Paving is a process that consumes significant natural resources, generates significant waste, and amplifies greenhouse gas emissions. The incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in the base and sub-base layers emerges as a sustainable alternative with the potential to reduce costs and decrease the need for new materials. In the Brazilian context, despite initiatives promoted by organizations such as the National Department of Infrastructure and Transport (DNIT), there is still a lack of references regarding the use of RAP. This, in turn, represents an alternative capable of replacing aggregates and enhancing properties through the process known as granulometric stabilization, with its application guided by economic, logistical, and qualitative aspects of the mixture. The proper performance of pavement structures is directly linked to the assessment of mechanical properties of constituent materials, such as density, optimum moisture content, California Bearing Ratio (CBR), permeability, resilient modulus (RM), and permanent deformation (PD). The behavior of mixtures is influenced by the RAP content employed, as well as the mechanical characteristics of RAP itself and the soil or aggregates used. Although research highlights the benefits of incorporating RAP, there is a demand for more robust technical standards and additional data in the Brazilian context regarding its application. Therefore, this article aims to contribute by summarizing information related to national standards, costs, best practices, international experiences, and related studies on the use of RAP in the layers beneath the pavement surface.

KEY WORDS: Paving; Standard Specifications; Road Construction Techniques; Mechanical Properties.

¹ Universidade Federal da Bahia, joosewaybricker@ufba.br; carolinedal@ufba.br.



INTRODUÇÃO

A construção civil em geral demanda grandes volumes de insumos e energia (queima de combustíveis e energia elétrica) e geram grande volume de resíduos. A utilização de alternativas ao processo convencional pode reduzir o potencial de aquecimento global e de toxicidade do ar, solo e água. O Reciclado de Pavimento Asfáltico (RPA), também chamado Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), é o material produzido a partir da fresagem de pavimentos para manutenção, sendo composto por concreto asfáltico moído durante o processo de fresagem. O fresado tem características físicas comparáveis às características do concreto asfáltico original, onde a granulometria pode variar de acordo com o processo de fresagem e estocagem e o ligante envelhecido conforme idade do pavimento original (HOPPE *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016 SAVIETTO, 2017).

A adição de RPA em misturas para bases e/ou sub-bases granulares, quando bem dimensionadas, incluem melhora na capacidade de suporte, boa drenagem e boa durabilidade. Porém, quando mal dimensionada ou não executada conforme dimensionado a adição pode causar um mau desempenho do pavimento e diminuir a capacidade de suporte da base granular (CHESNER *et al.*, 1998).

Nesse contexto, considerando a necessidade de dar uma destinação adequada ao material, entre outras vantagens inerentes ao seu reaproveitamento, este trabalho concentrou-se em realizar uma revisão abrangente do estado da arte, abordando não apenas o que tem sido estudado e os resultados obtidos, mas também fornecendo um resumo das questões relacionadas à produção (extração, transporte, técnicas de reciclagem) e aos custos envolvidos. Para isso, foram analisadas várias publicações de pesquisadores, associações de produtores e departamentos de transporte.

INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES RODOVIÁRIO NO BRASIL

De acordo com os dados da Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de Rodovias (CNT, 2022), o Brasil possui menos de um quarto de sua malha rodoviária pavimentada, predominantemente com pavimentos asfálticos. Além disso, é necessário realizar reconstruções, restaurações e manutenções em cerca de 100 mil quilômetros de rodovias, demandando um investimento estimado de aproximadamente R\$ 75 bilhões. Isso implica que não há apenas os custos de implantação, mas também os relacionados às intervenções necessárias. Quanto ao uso significativo de asfalto, é possível acessar informações sobre o mercado brasileiro por meio de um painel dinâmico disponibilizado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP (ANP, 2023), conforme apresentado na Figura 1, que resume a quantidade total de cimentos asfálticos vendidos anualmente. O mercado de cimento asfáltico de petróleo continua a crescer, especialmente para aplicações em revestimento asfáltico. No entanto, já existem estudos na literatura brasileira e normativas nacionais que indicam a possibilidade de incorporação de RPA, o que, por sua vez, poderia levar a uma redução do consumo.

O DNIT, por meio da Resolução N°14/2021 (DNIT, 2021), estabelece que todos os projetos de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias do próprio DNIT devem incluir o reaproveitamento de RPA, caso seja produzido no empreendimento. No Brasil, já existem diversos registros de obras que utilizaram RPA, como a recuperação da Rodovia Ayrton Senna (SP) em 2011, a restauração da Rodovia dos Imigrantes (SP) em 2012, a recuperação de trechos da Via



DOI: [10.29327/1430212.49-39](https://doi.org/10.29327/1430212.49-39)

O USO DO RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO (RPA) NA ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS GEOTECNICAS DE PAVIMENTOS

Dutra BR-116 em 2015 (SP) e a recuperação de trechos da Rodovia Fernão Dias BR-381 em 2020 e 2021 (RS, SP e MG), entre outras. Apesar disto, mesmo com os exemplos apresentados, ainda não existem dados disponíveis para consulta que indiquem a quantidade total de RPA utilizada em obras em todo o país.

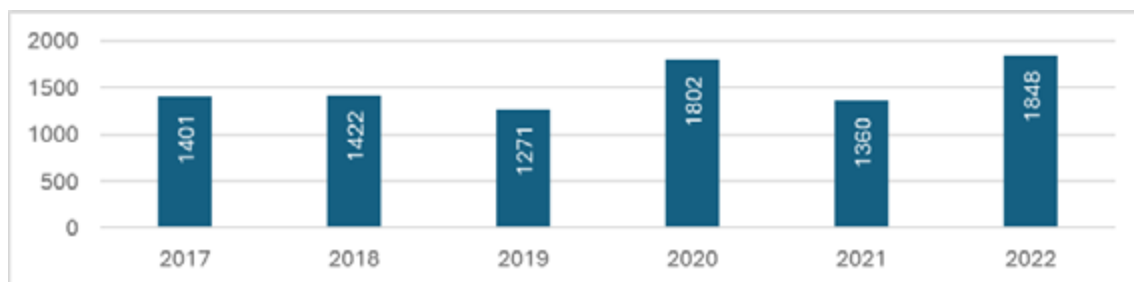


Figura 1. Quantidade total de CAP vendido anualmente no Brasil em milhares de toneladas (ANP, 2023)

Com relação às especificações de serviços com RPA, o próprio DNIT já publicou normas para reciclagem in situ com adição de espuma de asfalto (DNIT 166/2013-ES) e com adição de cimento Portland (DNIT 167/2013-ES), além de reciclagem em usina com adição de espuma de asfalto (DNIT 169/2014-ES). Adicionalmente, há a especificação de serviço referente ao concreto asfáltico reciclado em usina a quente (DNIT 033/2021-ES). O DER-SP também tem publicações para reciclagem in situ com adição de espuma de asfalto (ET-DE-P00/033), com emulsão (ET-DE-P00/034), com adição de cimento e brita (ET-DE-P00/035), com adição apenas de brita (ET-DE-P00/036) e para reciclagem em usina com adição de espuma de asfalto (ET-DE-P00/049). Inclusive o DER-PR tem publicações para reciclagem in situ com adição de espuma de asfalto (DER/PR ES-P 32/05), cimento Portland (DER/PR ES-P 33/05) e a partir de estabilização granulométrica (DER/PR ES-P 34/05). Apesar do esforço regulatório e técnico empreendido pelos órgãos competentes, há ainda necessidade de preenchimento de lacunas como com relação a dosagem. Outro fato importante, agora no contexto do modal aeroportuário, é que a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) ainda não disponibiliza publicações específicas referentes à reciclagem de pavimentos aeroportuários, demonstrando uma área que poderia ser alvo de futuras regulamentações e normativas para promover práticas sustentáveis e eficientes na gestão de pavimentos de aeroportos.

Custos Associados às Obras de Pavimentação

Segundo Copeland *et al.* (2011), os custos associados à produção de asfalto podem ser divididos em quatro categorias principais: materiais, produção na planta, transporte e aplicação/construção. Entre essas categorias, os materiais representam a parcela mais significativa dos custos, correspondendo a cerca de 70% do custo total para a construção de pavimentos flexíveis. Além disso, ao planejar os custos de obras que envolvem a reciclagem de materiais, é fundamental considerar outros fatores, como a disponibilidade do material, a distância de transporte, o tipo de reciclagem empregado (in situ ou em usina) e a necessidade de estabilização química (com cal, cimento, emulsão, espumado), entre outros.

No contexto brasileiro, as referências de custos para obras de infraestrutura, como o SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) e o SICRO (Sistema de Custos Referenciais de Obras), indicam que os insumos representam mais de 90% dos custos



diretos em obras de pavimentação. A Tabela 1 foi elaborada com o objetivo de destacar de maneira clara a redução dos custos diretos associados à reciclagem do material fresado em projetos de pavimentação, permitindo observar a diminuição do custo total, principalmente devido à economia nos insumos.

Tabela 1. Custos para execução de camadas de pavimentos com e sem reciclagem de material fresado

Tipo de Custo	SICRO (ref. Bahia 2023/01)			
	Base de Brita Graduada	Reciclagem <i>in situ</i>	CBUQ faixa "C"	Reciclagem em Usina
Código	4011276	4011484	4011463	4011478
Custo Unitário	R\$ 163,40	R\$ 68,95	R\$ 206,73	R\$ 173,78
Unidade	m ³	m ³	t	t
Equipamentos	3,30%	40,05%	3,90%	4,87%
Mão de Obra	0,08%	1,98%	0,76%	0,95%
Transporte	3,35%	1,37%	3,62%	4,51%
Insumos	93,27%	56,60%	91,72%	89,67%

EXPERIÊNCIA AMERICANA COM O USO DO RPA

A *Federal Highway Administration* (FHWA, 1981) divulgou o projeto de reciclagem a frio de pavimentos executado em Tamworth, NH, USA. Desde então, a própria FHWA, os Departamentos Estaduais de Transportes e a *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA) desenvolveram e publicaram diversas normas, projetos e manuais com boas práticas para reciclagem de RPA. Fora do modal rodoviário, a *Federal Airport Administration* (FAA) apresenta requisitos para utilização do RPA em aeroportos através da circular orientativa AC- 150/5370-10H - *Standard Specifications for Construction of Airports*.

De acordo com uma pesquisa publicada pela *National Asphalt Pavement Association* (NAPA, 2022), em 2021 os Estados Unidos produziram um total de 137,5 milhões de toneladas de RPA (Reciclado de Pavimento Asfáltico). Desse montante, 101,3 milhões de toneladas foram estocadas, enquanto 99,1 milhões de toneladas foram recicladas. Esse número representa um aumento significativo de 68,9% em relação a 2009, quando a pesquisa teve início. Conforme apresentado na Figura 2, do total de asfalto reciclado em 2021, mais de 95% do material foi utilizado na produção de misturas asfálticas para a construção de novos pavimentos, enquanto apenas 4% foram empregados como agregados. O uso do RPA possibilitou uma redução no consumo de ligante asfáltico de aproximadamente 4,7 milhões de toneladas e de agregados virgens em cerca de 90 milhões de toneladas, resultando em uma economia estimada de mais de US\$ 3,4 bilhões em insumos. Além dos benefícios financeiros, o uso do RPA também teve um impacto positivo na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs), diminuindo as emissões em 2,6 milhões de toneladas de CO₂e. As quantidades de emissões evitadas estão apresentadas na Figura 2, equivalendo ao total anual de emissões de mais de 570.000 veículos de passeio. Esses números refletem o potencial e os benefícios ambientais e econômicos associados à utilização eficaz do RPA na indústria de pavimentação asfáltica nos Estados Unidos.



DOI: 10.29327/1430212.49-39

O USO DO RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO (RPA) NA ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS GEOTECNICAS DE PAVIMENTOS

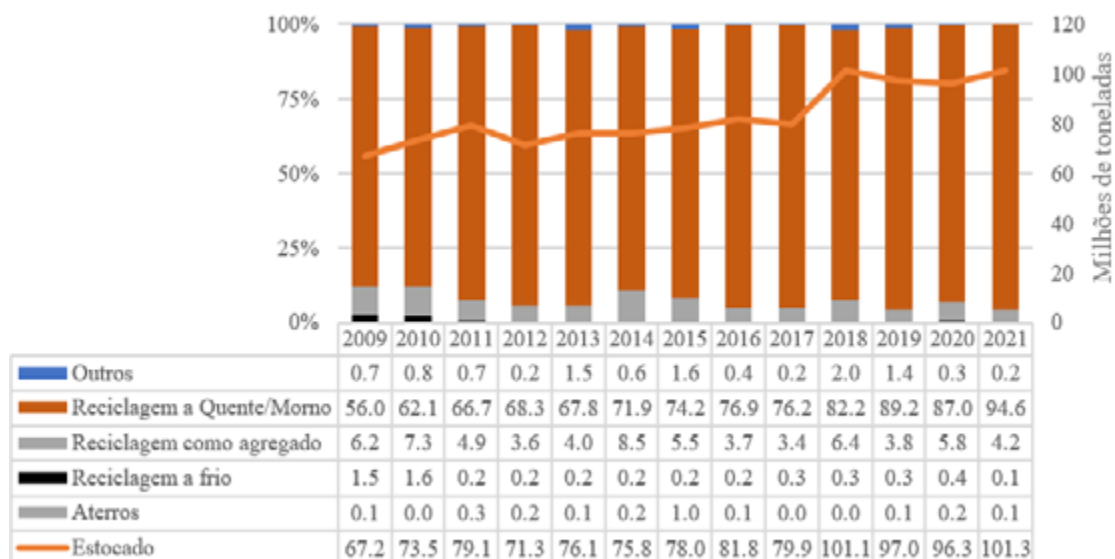


Figura 2. Comparação entre total de RPA estocado e sua destinação em milhões de toneladas (adaptado de NAPA, 2022)

A RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A gestão adequada do RPA é essencial para garantir a qualidade e o desempenho das misturas, sejam elas granulares ou asfálticas, que incorporam esse material. Essa gestão abrange diversos cuidados, desde a obtenção do material fresado. É possível ressaltar os seguintes aspectos para garantir uma gestão eficaz do RPA: a técnica adequada aplicada, a preservação da pureza (proteção contra contaminações), o destorroamento, a proteção contra a umidade, a caracterização por meio de ensaios, a classificação e a separação/fracionamento/granulometria.

Extração e Transporte do Material

O RPA é obtido por meio da técnica de fresagem a frio, que consiste no desgaste do pavimento por meio abrasivo. Durante o processo, parte dos agregados presentes no pavimento é quebrada, resultando em uma alteração na curva granulométrica do material que estava originalmente na pista. O material obtido a partir da fresagem não possui as mesmas características que tinha quando foi originalmente aplicado na pavimentação. O RPA fresado geralmente forma aglomerados com uma granulometria mais grosseira do que o material original. Após a extração do betume (ligante asfáltico) do RPA, também é possível observar uma curva granulométrica mais fina devido à quebra dos agregados durante o processo de fresagem, conforme descrito por Bonfim (2010 e 2021).

Desde a fresagem, transporte até a estocagem o material deverá ser mantido livre de contaminações, destorroado para reduzir a existência de grumos e protegido contra umidade. O material deverá ser ensaiado e caracterizado conforme sua granulometria e a quantidade de ligante (DNIT, 2014 e 2021). O RPA produzido deve ser classificado e separado em pilhas homogêneas para permitir maior controle da mistura a ser realizada. O fracionamento do material fresado em tamanhos diferentes de partículas permite maior flexibilidade para a dosagem. As frações mais grossas do material geralmente possuem menos asfalto incorporado do que as mais finas, isto ocorre devido ao agregado fino possuir proporcionalmente ao seu volume uma área maior revestida pelo ligante (FHWA, 2018). Estudos como o conduzido por Lee *et al.* (2012) são valiosos para entender as diferenças entre frações grossas e finas de RPA. Essas



diferenças podem afetar a dosagem e o desempenho das misturas asfálticas recicladas com alto teor de RPA. Esses pesquisadores observaram uma diferença de pelo menos 2% entre frações grossas e finas para misturas asfálticas com alto teor de RPA.

Técnicas para Reciclagem de Pavimentos

A reciclagem a frio *in situ* é realizada a partir de recicladoras, como a ilustrada na Figura 3a. Essas máquinas têm a capacidade de fresar o asfalto existente, tornando-o granular, além de aplicar com precisão o agente ligante e a água, realizando a mistura necessária. Durante o processo, também é viável introduzir aditivos: cimento, água, emulsão betuminosa e espuma de asfalto. A reciclagem a frio *in situ* possibilita a reutilização do RPA em camadas de sub-base e base. O processo para solo/agregado-RPA e misturas asfálticas estão descritos a seguir.

O processo de estabilização granulométrica envolve a combinação de solo/agregado e RPA para aplicação em camada de base ou sub-base de pavimento e segue comumente os seguintes passos: preparação do material geotécnico (solo e/ou agregado); segregação do RPA por tamanho; dosagem; mistura (de forma homogênea) em equipamento adequado, como um misturador de solo ou uma recicladora, podendo, se necessário, adicionar água ou outros aditivos para garantir a coesão da mistura; compactação realizada com equipamentos de compactação, como rolos compactadores, de acordo com as especificações do projeto.

A reciclagem a frio em usina é realizada após a obtenção do RPA por meio da fresagem a frio do pavimento asfáltico. O material fresado é transportado para um local onde é armazenado e posteriormente classificado e segregado. As usinas de mistura a frio podem ser fixas ou móveis e são mais simples em comparação com as usinas de mistura a quente, pois não requerem o processo de secagem e aquecimento dos materiais. Pode-se também utilizar uma usina de pré-misturado a frio, como a da fabricante BOMAG MARINI ilustrada na Figura 3b. A principal vantagem desse processo em relação à reciclagem *in situ* é o maior controle tecnológico no processo de mistura. No entanto, é importante considerar o custo adicional de transporte ao levar o material fresado para a usina, um fator que não está presente na reciclagem *in situ*. Portanto, o custo adicional de transporte deve ser avaliado durante o planejamento do projeto, e é recomendável que a usina esteja localizada o mais próximo possível dos locais de produção do RPA e aplicação do material reciclado. (CUNHA, 2010; MARINI, 2018; BONFIM, 2021).

A reciclagem de RPA misturado a quente pode ser realizada em usinas do tipo gravimétrica ou volumétrica. Usinas gravimétricas usualmente são de maior porte e menor capacidade de mobilização quando comparadas às usinas volumétricas que podem ser inclusive do tipo móvel como a usina da Figura 3c. O processo para reciclagem em usinas volumétricas também exige peneiramento e segregação prévia do RPA para início do processo de mistura. Esse tipo de usina não contempla jogo de peneiras no seu processo. O RPA e os agregados virgens são inseridos nos silos dosadores. Na sequência, o tambor secador recebe o RPA, agregados virgens o ligante asfáltico e realiza a mistura. Após a mistura, a massa asfáltica passa pelo elevador para ser descarregada nos caminhões para transporte. A utilização de usinas do tipo gravimétrica, apesar de dificultar questões como mobilização, permite maior controle tecnológico quando comparado com as usinas móveis. Nesse tipo de usina, tanto agregados quanto RPA após passarem pelos secadores e já aquecidos, passam por uma série de peneiras para separação por granulometria. Então são depositados em silos quentes até que sejam transportados



DOI: [10.29327/1430212.49-39](https://doi.org/10.29327/1430212.49-39)

O USO DO RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO (RPA) NA ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS GEOTECNICAS DE PAVIMENTOS

para o misturador. Durante a homogeneização do material são adicionados o ligante asfáltico e o agente rejuvenescedor. Após esse processo, a mistura está pronta para carregamento nos caminhões e transporte (CUNHA, 2010; MARINI, 2018; BONFIM, 2021).



Figura 3. Reciclagem com RPA: (a) - Tratamento de materiais na reciclagem a frio, (b) Usina móvel do tipo MARINI 600 US para mistura a frio, (c) Usina móvel para misturas a quente; volumétrica. (MARINI, 2018 e WIRTGEN, 2020)

Comparada à reciclagem a quente, a reciclagem a frio oferece benefícios ambientais significativos. Ela permite a redução tanto das emissões de carbono quanto do consumo de energia devido às baixas temperaturas de construção (DAY *et al.*, 2019). Salienta-se que usinas comuns para misturas asfálticas a quente podem ser adaptadas para incorporar RPA, desde que sejam devidamente modificadas para essa finalidade.

ESTUDOS REALIZADOS COM RPA PARA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Com base nas normativas e em pesquisas recentes realizadas no Brasil, como as de Santos *et al.* (2018) e Araújo Jr (2019), entre outras mencionadas aqui, foi possível compilar os ensaios a serem conduzidos para avaliar os materiais constituintes básicos em uma mistura solo-RPA. Para os componentes do solo, bem como a mistura, os ensaios incluem granulometria, massa específica, curva de compactação (com medições de massa específica aparente seca – MEAS - e umidade ótima - $W_{ót}$), Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) com análise de expansão, expansibilidade, contração, limites de consistência, módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP). Para o RPA em si, os ensaios específicos compreendem a análise da granulometria, massa específica, teor de asfalto e o ensaio Rice. Alguns estudos estão detalhados a seguir, fornecendo uma compreensão abrangente dos efeitos da adição de RPA ou mesmo cimento em diferentes tipos de solos e agregados.

Misturas Solo-RPA

Hasan *et al.* (2018) investigaram a relação entre RPA e umidade no MR de subleitos misturados com RPA-solo no Novo México, EUA. As amostras foram extraídas da mesma rodovia e classificadas como A-2-6 pela AASHTO. A pesquisa utilizou várias misturas com teores de RPA variando de 0 a 75%. Observou-se um aumento no MR com o aumento do teor de RPA, especialmente próximo à umidade ótima da mistura.

Mustapha *et al.* (2014) usaram RPA para estabilizar um solo laterítico, classificado como argila A-6 pela AASHTO. As misturas variaram em teores de RPA de 5% e foram compactadas usando energia British Standard Heavy (BSH). Além da compactação, outros testes como CBR e resistência à compressão não confinada foram realizados, destacando uma amostra de mistura RPA-solo (60%-40%) com a maior massa específica seca.



Mousa e Mousa (2017) estudaram as propriedades mecânicas de misturas RPA-solo, usando um solo classificado como areia (A-1-B) pela AASHTO. Foram feitas amostras de controle de RPA (100%) e areia (100%), além de 9 misturas areia-RPA com variações de 10% entre elas. Cada amostra passou por um ensaio de compactação Proctor e um teste de Índice de Suporte Califórnia. Os principais resultados desses estudos, e outros, estão compilados na Tabela 2.

Tabela 2. Pesquisas sobre misturas RPA-Solo e propriedades mecânicas testadas

Ano	Auto	Classific. HRB	MEAS	$W_{ót}$	CBR	UCS	MR
2014	Akinwumi	A-2-6	Menor	Menor	Maior	Menor	N/D
2014	Mustapha <i>et al.</i>	A-6	Maior	Menor	Maior	Maior	N/D
2017	Mousa e Mousa	A-1-B	Maior	Menor	Maior	N/D	N/D
2018	Hasan <i>et al.</i>	A-4	N/D	N/D	N/D	N/D	Maior
2020	Ogunrinde <i>et al.</i>	A-6	Maior	Menor	Maior	N/D	N/D

* MEAS: Massa Específica Aparente Seca Máxima, $W_{ót}$:umidade ótima, CBR: Índice de Suporte Califórnia – ISC, UCS: Compressão não confinada. MR: Módulo de Resiliência

É possível observar que a umidade ótima é menor e o CBR é maior em todas as situações, com o acréscimo considerado ideal do RPA. Além disso, apenas uma pesquisa registrou menor massa específica aparente seca na mistura com RPA incorporado. Na pesquisa que foi executado MR, esse apresentou melhoria no comportamento mecânico.

Misturas RPA-AV e RPA-AR

Vários estudos já foram publicados a partir de testes das propriedades mecânicas de misturas feitas com RPA e agregados virgens (RPA-AV) e RPA com agregados reciclados (RPA-AR) para bases granulares. O objetivo em geral de misturas RPA-AV e RPA-AR é de redução de custos e impactos ambientais causados pela extração e transporte dos agregados virgens até sua aplicação.

Ullah e Tanyu (2019) estudaram misturas RPA-AV buscando diretrizes para bases granulares. Após coletar amostras de RPA de 14 locais e avaliar o teor de ligante, selecionaram 4 para mistura com agregados virgens. Essas misturas foram compactadas usando o método ASTM D7382 e avaliadas quanto ao MR, DP e CBR. O MR das misturas RPA-AV superou o das 100% VA. A adição de RPA aumentou deformações, porém, com teores mais baixos de RPA, o desempenho foi superior ao de 100% de agregados virgens.

Por sua vez, Arshad e Ahmed (2017) analisaram misturas com agregados virgens, RPA e RCA (Recycled Concrete Aggregate). Foram feitas combinações com RPA-AV e RPA-RCA, e submetidas a testes para determinar o MR. O RPA tendeu a aumentar as deformações, mas o MR foi mais alto comparado ao RCA e AV, atribuído à resistência do ligante asfáltico à deformação.

Sultan *et al.* (2013) estudaram o RPA no Iraque, visando melhorar suas propriedades mecânicas. Os testes mostraram que o RPA não cumpria os padrões locais. Ao misturar com agregados virgens, o CBR diminuiu com o aumento do teor de RPA, mas as misturas com baixo teor de RPA (até 60%) mostraram um CBR aceitável para sub-bases.

Já Bennert e Maher (2005) examinaram como a granulometria influencia o desempenho de bases. Avaliaram misturas com agregados virgens, RCA e RPA em diversos testes. Concluíram que a mistura



DOI: 10.29327/1430212.49-39

O USO DO RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO (RPA) NA ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS GEOTECNICAS DE PAVIMENTOS

RPA-AV deve ter no máximo 50% de RPA, pois valores superiores reduzem o CBR e a permeabilidade em comparação ao agregado virgem. Mais detalhes desses estudos e outros estão na Tabela 3.

Tabela 3. Pesquisas sobre misturas RPA-AV e propriedades mecânicas testadas

Ano	Autor	MEAS	$W_{ót}$	Permeabilidade	CBR	MR	DP
1999	Taha et al.	Menor	Sem Alteração	Maior	Menor	N/D	N/D
1999	MacGregor et al.	N/D	N/D	Sem Alterações	N/D	Maior	Maior
2005	Bennert e Maher	Menor	Menor	Menor	N/D	Maior	Maior
2005	Mokwa e Peebles	Menor	Menor	Maior	N/D	N/D	N/D
2013	Sultan et al.	Menor	Menor	N/D	Menor	N/D	N/D
2017	Seferoglu et al	Menor	Menor	Menor	Menor	N/D	N/D

* MEAS: Massa Específica Aparente Seca Máxima, $W_{ót}$: umidade ótima, CBR: Índice de Suporte Califórnia – ISC, MR: Módulo de Resiliência, DP: Deformação Permanente

As pesquisas disponíveis sobre desempenho de misturas RPA-AV ou RPA-AR não apresentaram melhora nas propriedades mecânicas quando comparadas à bases de agregados virgens. Nesse caso o único parâmetro que aparenta melhora é o MR, entretanto MEAS, $W_{ót}$, CBR e DP apresentam piora. Portanto, o teor de RPA incorporado deve ser limitado de forma a preservar o desempenho do pavimento e não encurtar sua vida útil.

Misturas com Aditivo Químico

Yuan *et al.* (2010) conduziram um estudo para o Texas DoT, avaliando misturas de RPA e agregados, tratadas com cimento Portland (CP) para aplicações em camadas de base. Foram testadas misturas com diferentes teores de RPA (100%, 75% e 50%) e diferentes quantidades de cimento (0%, 2%, 4% e 6%) em laboratório. Inicialmente, antes da adição de cimento, as misturas apresentaram menor umidade ótima e massa específica seca máxima à medida que o teor de RPA aumentava. Após a adição de cimento, houve um aumento na massa específica seca máxima, umidade ótima e resistência à compressão não confinada dos corpos de prova moldados com 7 dias de cura. Os teores ideais de cimento foram de 4%, 3% e 2% para as misturas com 100%, 75% e 50% de RPA, e observou-se que o teor de betume nas amostras de RPA não teve influência nos resultados dos ensaios.

Khay *et al.* (2014) realizou um estudo experimental de laboratório com misturas RPA-AV e teores de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de RPA. O CP foi adicionado para estabilizar as misturas, com uma proporção de 6% do peso total. As amostras foram compactadas usando o método Proctor Modificado, e os ensaios de resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à tração indireta e módulo de elasticidade foram realizados após 7, 14 e 28 dias de cura, de acordo com os procedimentos normativos aplicáveis. Os resultados demonstraram que um aumento no teor de RPA levou a uma redução na resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à tração indireta e módulo de elasticidade. No entanto, para teores de RPA de até 60%, ainda foi possível obter propriedades mecânicas aceitáveis para utilização como camada de base.

Saeed *et al.* (2022) investigaram a influência da adição de materiais reciclados (RPA e CKD) para reforço de solos coesivos. Utilizaram um solo siltoso de alta plasticidade (MH) conforme a classificação do Sistema de Classificação Unificada dos Solos (USCS). Inicialmente, estabilizaram amostras do solo com diferentes teores de CKD (5%, 10%, 15% e 20%) e as compactaram seguindo o método Proctor



Modificado, observando que maiores teores de CKD resultaram em umidade ótima menor e massa específica aparente seca maior. Os pesquisadores conduziram ensaios de resistência à compressão não confinada em amostras com diferentes idades de cura (7, 14 e 28 dias) após a estabilização com CKD. Os resultados indicaram um teor ótimo de CKD de 20%. Em seguida, realizaram misturas do solo com 20% de CKD e diferentes teores de RPA (0%, 15%, 25% e 35%). Conforme o teor de RPA aumentava, a MEAS aumentava e a $W_{ót}$ diminuía. Além disso, observaram um aumento na resistência à compressão não confinada das amostras com o aumento do teor de RPA até o teor ótimo de 25% para todas as idades dos corpos de prova ensaiados.

Lima (2020) analisou o impacto da adição de cimento Portland (CP) e RPA na estabilização de solo argiloso classificado como silte argiloso (A-7-6) de acordo com a AASHTO. Foram preparadas misturas com diferentes teores de RPA (0%, 20%, 40%, 50%, 60% e 80%) com e sem adição de CP (3%). Essas misturas foram compactadas seguindo o método Proctor Intermediário e submetidas a ensaios de RCS e RTCD. Os resultados mostraram que à medida que o teor de RPA aumentava nas misturas, houve um aumento na MEAS e uma redução na $W_{ót}$, tanto para misturas estabilizadas com CP quanto para misturas sem cimento. Em relação à resistência à compressão simples, os corpos de prova apresentaram valores superiores à medida que o RPA era adicionado até o teor ótimo de 60% de RPA, independentemente da idade de cura (7, 14 e 28 dias). Os resultados do ensaio RTCD seguiram a mesma tendência da RCS, com valores aumentando à medida que o teor de RPA aumentava, até o teor ótimo de 60% de RPA, tanto com CP quanto sem cimento, para todas as idades de ensaio. Além disso, os resultados de expansão e CBR também mostraram melhorias à medida que o teor de RPA aumentava, chegando a 80% de RPA. De acordo com o manual de pavimentação do DNIT (2006), as amostras sem cimento foram consideradas adequadas para uso como subleito e reforço de subleito, enquanto as amostras com cimento foram consideradas adequadas para uso como camada de sub-base a partir da adição de 40% de RPA.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos apresentados destacam que vários fatores, incluindo o teor de RPA incorporado, a origem do agregado utilizado e a granulometria do RPA, têm um impacto significativo no desempenho das misturas. Em muitos casos, observou-se uma melhoria nas propriedades dos materiais, incluindo o parâmetro MR. Isso é significativo quando se lida com solos que não atendem inicialmente aos requisitos de capacidade de suporte de acordo com as especificações. É importante notar que as variações nas propriedades estão relacionadas às proporções de RPA na mistura, e atualmente não existem procedimentos padronizados no Brasil para a dosagem de misturas envolvendo material granular e RPA, seja solo-RPA ou brita-RPA, para aplicação em camadas de base ou sub-base. Além disso, não há especificações claras relacionadas às granulometrias necessárias para uma estabilização adequada com o RPA.

O uso de RPA em camadas abaixo do revestimento do pavimento deve ser dimensionado com base nas propriedades mecânicas necessárias para atender aos regulamentos locais. Ensaio específicos foram mencionados para analisar os materiais puros e em mistura geotécnica a fim de garantir um bom desempenho e durabilidade do pavimento.

Logo, o RPA já pode ser considerado um material valioso e de qualidade que pode substituir agregados e alguns ligantes em determinadas aplicações. O uso de RPA é motivado principalmente pelos custos de materiais virgens e transporte. A decisão de usar RPA deve levar em conta fatores econômicos, disponibilidade de materiais, localização da planta de produção, capacidade de produção e

DOI: [10.29327/1430212.49-39](https://doi.org/10.29327/1430212.49-39)

O USO DO RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO (RPA) NA ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS GEOTECNICAS DE PAVIMENTOS

compatibilidade com outros materiais. Além dos custos diretos mencionados anteriormente, a possível melhoria das propriedades mecânicas dos materiais usados nas camadas de base e sub-base pode resultar na redução da espessura das camadas subsequentes do pavimento, levando a economias financeiras.

Por fim, verificou-se que existem poucos dados nacionais disponíveis sobre a produção e utilização de material fresado na restauração ou construção de novos pavimentos. A coleta desses dados é de extrema importância para avaliar o verdadeiro potencial do impacto da reciclagem de pavimentos na infraestrutura nacional. Com a implementação adequada e a coleta de dados para avaliar seu desempenho, o uso do RPA pode se tornar ainda mais difundido no Brasil e em outros países, promovendo práticas mais sustentáveis na indústria de pavimentação e contribuindo para a preservação do meio ambiente. Foi observada também uma lacuna de normativas específicas para a aplicação de RPA na infraestrutura aeroportuária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Painel Dinâmico do Mercado Brasileiro de Asfaltos**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em 08 set. 2023.

AKINWUMI, I. I. Plasticity, strength and permeability of reclaimed asphalt pavement and lateritic soil blends. **International journal of scientific and engineering research**, v. 5, n. 6, p. 631-636, 2014.

ARAÚJO Jr, L. P. V. Estudo sobre estabilização de solo com material fresado de pavimentação asfáltica. Dissertação de mestrado. UFSCar. São Carlos, 2019.

ARSHAD, M.; AHMED, M.F.. Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 83-97, 2017.

BENNERT, T. e A. M. **The development of a performance specification for granular base and subbase material**. Report No. FHWA-NJ-2005-003. New Jersey Department of Transportation, Trenton, 2005.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3ª ed., São Paulo, 2010.

BONFIM, V. **Pavimento sustentável**. Exceção Editorial: São Paulo, 2021.

BRETT, A. W.; WILLIS, J. R. e SHACAT, J. **Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage**. National Asphalt Pavement Association, Greenbelt, MD, EUA, 2022.

CHESNER, W. H. et al. **User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction**. Recycled Materials Resource Center, 2002.

CNT. de Rodovias 2022: Relatório Gerencial. Brasília. **Pesquisa CNT de Rodovias**, 2022.

COPELAND, A. et al. **Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice**. McLean: US. Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2011.

CUNHA, C. M. **Reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis: diferentes tipos de reciclagem**. 2010. Tese de Doutorado.

DAY, D., et. al. Emulsion cold mix asphalt in the UK: A decade of site and laboratory experience. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 159-ES: Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio – Especificação de serviço**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, Rio de Janeiro, 2011.

_____. **DNIT 033-ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado em usina a quente – Especificação de serviço**. Instituto de Pesquisas em Transportes – IPR, Rio de Janeiro, 2021.

_____. **DNIT 169-ES: Pavimentação - Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto - Especificação de Serviço**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, Rio de Janeiro, 2014.

_____. **DNIT Sistema de custos referenciais de obras – SICRO**. Disponível em <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos>. Acesso em 24 jun. 2023.



FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Demonstration Project 39 – Asphalt Recycling Tamworth Cold Recycling Project**, 1981.

_____. **FHA. State of the Knowledge for the Use of Asphalt Mixtures with Reclaimed Binder Content**, Washington, EUA, 2018.

HASAN, M.M.; ISLAM, M.R.; TAREFDER, R. A. Characterization of subgrade soil mixed with recycled asphalt pavement. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 5, n. 3, p. 207-214, 2018.

HOPPE, E. J. et al. **Feasibility of reclaimed asphalt pavement (RAP) use as road base and subbase material**. Charlottesville, VA, USA, 2015.

EUCH KHAY, S. E. et al. Laboratory investigation of cement-treated reclaimed asphalt pavement material. **Journal of materials in civil engineering**, v. 27, n. 6, p. 04014192, 2015.

LEE, H. et al. **Development of quality standards for inclusion of high recycled asphalt pavement content in asphalt mixtures-phase II**. University of Iowa. Public Policy Center, 2015.

LIMA, D. S. A. **Efeito da adição de cimento Portland e RAP na estabilização de solo argiloso da formação Guabirotuba**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Dissertação de Mestrado. 2020.

MACGREGOR, J. A. C. et al. Structural numbers for reclaimed asphalt pavement base and subbase course mixes. **Transportation research record**, v. 1687, n. 1, p. 22-28, 1999.

MARINI. **MAGNUM MAX - Usinas de Asfalto**. Cachoeirinha: Bomag Marini Latin America, 2018a.

MARINI. **Usinas de Solos - US MAX**. Cachoeirinha: Bomag Marini Latin America, 2018b.

MOKWA, R. L. et al. **Evaluation of the engineering characteristics of RAP/aggregate blends**. Montana. Dept. of Transportation. Research Programs, 2005.

MOUSA, R.; MOUSA, M. Viability assessment of using reclaimed asphalt pavement—Sand blend in road construction: A case study in Egypt. In: **Proceedings of the 96th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC, USA**. 2017. p. 8-12.

MUSTAPHA et al. Stabilization of A-6 Lateritic Soil using Cold Reclaimed Asphalt Pavement. International. **Journal of Engineering and Technology**. Volume 4 No. 1, 2014.

OGUNRINDE, E. O. et al. Development of an Empirical Model for A-6 Soil Stabilised with Reclaimed Asphalt Pavement. **2nd International Civil Engineering Conference**, Minna, Nigeria, 2020.

SANTOS, A. J et al. Avaliação do comportamento mecânico de um solo laterítico e um solo não-laterítico estabilizado com asfalto fresado. **XIV Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Foz do Iguaçu/PR. 2018.

SAVIETTO, J. P.. **Análise de impactos ambientais da restauração de um pavimento asfáltico pela Avaliação do Ciclo de Vida**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SAEED, S. A. et al. Evaluation of Incorporating CKD and RAP on the Performance of Cohesive Soil. **Iraqi Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 2, 2022.

SEFEROĞLU, A.I.G.; SEFEROĞLU, M. T.; AKPINAR, M. Vefa. Experimental study on cement-treated and untreated RAP blended bases: Cyclic plate loading test. **Construction and building materials**, v. 182, p. 580-587, 2018.

SULTAN, S. A, et al. Improvement of the mechanical characteristics of reclaimed asphalt pavement in Iraq. **Int. J. Struct. Civil Eng. Res**, v. 2, p. 22-29, 2013.

TAHA, R. et al. Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases. **Transportation Research Record**, v. 1652, n. 1, p. 264-269, 1999.

ULLAH, S.; TANYU, B. F. Methodology to develop design guidelines to construct unbound base course with reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and building materials**, v. 223, p. 463-476, 2019.

WANG, H. et al. Life-cycle assessment of airport pavement design alternatives for energy and environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 163-171, 2016.

WIRTGEN **Recicladoras a frio e estabilizadores do solo série WR**, Windhagen: Wirtgen GmbH, 2020.

YUAN, D. et al. **Cement treated RAP mixes for roadway bases**. 2010.

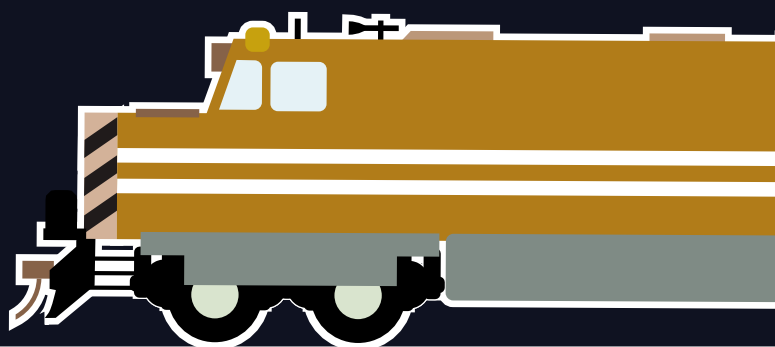


26° Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br



ABDER



**SEGURANÇA VIÁRIA E
GESTÃO DE RISCO EM RODOVIAS**

PROGRAMAÇÃO
TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS E ESTUDOS DE CASOS DE OBRAS
Quarta-feira, 21 de agosto

SALA TERRA CAÍDA		
SEGURANÇA VIÁRIA E GESTÃO DE RISCO EM RODOVIAS (ST06)		
⌚ 09:00	EC114	ESTUDO DE CASO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA ÁREA DE ESCAPE NA CURVA DA FERRADURA DA RODOVIA PR-170, EM PINHÃO/PR
⌚ 09:20	EC658	ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ROCHOSO NA MG-120, KM 147, POR MEIO DE TELA METÁLICA E CHUMBADORES SISTEMÁTICOS: ESTUDO DE CASO
⌚ 09:40	TT651	ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM MACIÇO ROCHOSO EM TRECHOS DAS RODOVIAS PE-160 E BR-104/PE COM ÊNFASE DA SEGURANÇA VIÁRIA
⌚ 10:20	TT937	ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA TIPO SMA COM ÊNFASE NO PARÂMETRO PNEU-PAVIMENTO - ESTUDO DE CASO NA AVENIDA DO CONTORNO EM BELO HORIZONTE/MG BRASIL
⌚ 10:40	TT218	INVESTIGAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A PRESENÇA DE BURACOS E O PADRÃO DE CONDUÇÃO VEICULAR
⌚ 11:00	EC002	INTRODUÇÃO À INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA DETECÇÃO E MAPEAMENTO DE SINALIZAÇÃO VIÁRIA
⌚ 11:20	EC386	UM ESTUDO DE CASO SOBRE SINISTROS DE TRÂNSITO NA RODOVIA BR-277/PR E AS AÇÕES PREVISTAS NOS PROGRAMAS DE CONCESSÃO RODOVIÁRIA PARA MELHORIA DA SEGURANÇA VIÁRIA
⌚ 12:00	TT763	ANÁLISE DE ACIDENTALIDADE NAS RODOVIAS SOB ADMINISTRAÇÃO DO DER/SP UTILIZANDO MAPAS DE CALOR



ESTUDO DE CASO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA ÁREA DE ESCAPE NA CURVA DA FERRADURA DA RODOVIA PR-170, EM PINHÃO/PR

Eleandro Campos Pereira¹; Fernando Furiatti Saboia²; Alexandre Castro Fernandes³; Lorena Nadine Baran⁴; Thais Mazzure Pedroso⁵; Luis Felipe Carraro⁶; Geovane Cardoso de Almeida⁷

RESUMO

O aumento do volume de tráfego pesado nas rodovias brasileiras gera como consequência maior risco de acidentes de trânsito, incrementando custos significativos aos cofres públicos, com despesas hospitalares, atendimento policial, reparos na infraestrutura, prejuízos aos usuários das vias causando danos ao patrimônio público e privado, além de risco a vida, pode-se levar em conta: danos físicos, emocionais e a perda econômica das vítimas. Mesmo com a modernização dos veículos, o excesso de peso, velocidade ou condições do local aumentam a chance de superaquecimento dos freios, resultando em falhas. O presente estudo trouxe solução para a implantação de um dispositivo de segurança – uma área de escape – na rodovia PR-170 km 461, em Pinhão/PR, onde o trecho por conta do seu formato é chamado de “curva da ferradura”. A declividade longa, seguida pela curva sinuosa tem a condição de causar sinistros onde veículos possam perder o controle e saírem da pista. Demandando a necessidade de implementação de melhorias que minimizem as consequências dos possíveis acidentes no local optou-se pela solução supracitada. A literatura mostra os benefícios deste dispositivo que cresce em quantidade no país, e, mesmo que ainda não existam normativas oficiais, torna necessário entender os parâmetros e a viabilidade técnico-econômica para a tomada de decisões. Foi realizado o estudo afim de definir um anteprojeto de uma área de escape para o local, limitado pela geologia da encosta o estudo foi concluído atendendo a limitação de espaço para uma solução em que sua projeção horizontal não ultrapassasse o limite de 101 metros. Construída sobre aterro em rocha e preenchida com argila expandida (cinasita), os estudos indicaram teoricamente que os veículos terão sua energia dissipada até pararem totalmente, devido ao condição do substrato (cinasita) que por seu poder de rolamento, seu comportamento fluido é capaz de no impacto do veículo proporcionar a transferência de energia até dissipá-lo totalmente, servindo como medida de segurança funcionalmente comprovada em casos críticos.

PALAVRAS-CHAVE: Área de escape; rodovias; veículos; caixa de retenção.

ABSTRACT

The increase in the volume of heavy traffic on Brazilian highways generates a greater risk of traffic accidents, increasing significant costs to public coffers, with hospital expenses, police assistance, infrastructure repairs, losses to road users causing damage to public and private property, in addition to the risk to life, the following can be considered: physical and emotional damage and the economic loss of the victims. Even with the modernization of vehicles, excess weight, speed or local conditions increase the chance of brakes overheating, resulting in failures. The present study brought a

¹ Engenheiro Civil, agente profissional, atua no DER, Ponta Grossa/PR. E-mail: eleandropereira@der.pr.gov.br

² Engenheiro Civil e Diretor Geral do DER, Curitiba/PR. E-mail: fernando.furiatti@der.pr.gov.br

³ Engenheiro Civil e Diretor de Operações do DER, Curitiba/PR. E-mail: alexandrecaastro@der.pr.gov.br

⁴ Engenheira Civil, residente técnica no DER, Ponta Grossa/PR. E-mail: lorenanadine@hotmail.com

⁵ Engenheira Civil, empresa Concremat S/A, atua no DER, Ponta Grossa/PR. E-mail: thais.pedroso@concremat.com.br

⁶ Engenheiro Civil, empresa Concremat S/A, atua no DER, Ponta Grossa/PR. E-mail: luis.carraro@concremat.com.br ⁷

Técnico Projetista, empresa Concremat S/A, atua no DER, Ponta Grossa/PR. E-mail: geovane.almeida@concremat.com.br



Eleandro Campos Pereira,
Fernando Furiatti Saboia, Alexandre Castro Fernandes,
Lorena Nadine Baran, Thais Mazzure Pedroso,
Luis Felipe Carraro, Geovane Cardoso de Almeida

solution for the implementation of a safety device – an escape area – on the PR-170 km 461 highway, in Pinhão/PR, where the section, due to its shape, is called “horseshoe curve”. The long slope, followed by the winding curve, can cause accidents where vehicles can lose control and leave the road. Demanding the need to implement improvements that minimize the consequences of possible accidents on site, the aforementioned solution was chosen. The literature shows the benefits of this device that is growing in quantity in the country, and, even though there are no official regulations yet, it makes it necessary to understand the parameters and technical-economic viability for decision making. The study was carried out in order to define a preliminary project for an escape area for the site, limited by the geology of the slope. The study was completed considering the space limitation for a solution in which its horizontal projection did not exceed the limit of 101 meters. Built on rock embankment and filled with expanded clay (kinsite), studies have theoretically indicated that the vehicles will have their energy dissipated until they come to a complete stop, due to the condition of the substrate (kinsite) which due to its rolling power, its fluid behavior is capable of in the impact of the vehicle, it provides the transfer of energy until it is completely dissipated, serving as a functionally proven safety measure in critical cases.

KEY WORDS: Escape areas; roads; vehicles; retention box.

INTRODUÇÃO

As estradas desempenham um papel crucial na infraestrutura de transporte, facilitando o movimento de mercadorias e pessoas. Com isso, o aumento populacional e o desenvolvimento econômico da sociedade resultam em mais tráfego nas rodovias, o que influencia diretamente a um aumento de acidentes de trânsito. Controlar a velocidade em descidas é um desafio, e o sistema de frenagem pode ter sua eficiência diminuída devido à redução progressiva do atrito entre as lonas e os tambores de freio, o chamado “*fading*” juntamente com o superaquecimento do sistema. Esses fatores podem ocasionar a perda de controle do veículo por parte do condutor. (CONTINENTAL, 2021).

Uma solução inovadora para conter veículos descontrolados que está crescendo no Brasil são as áreas de escape, que se trata de um local adjacente à rodovia com a finalidade de contenção de veículos. Santos (2022) argumenta que em trechos com inclinações e curvas acentuadas, a instalação dessas áreas é uma alternativa a ser considerada. Segundo a Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte – AASTHO (2018), quando a topografia indica a necessidade de declive em outro alinhamento, é desejável e apropriado a implantação da área de escape para que os veículos fora de controle possam diminuir a velocidade e parar longe do fluxo de tráfego principal.

De acordo com o Relatório Executivo de Impactos Sociais e Econômicos dos Acidentes de Trânsito nas aglomerações urbanas brasileiras, emitido pela IPEA (Instituto De Pesquisa Econômica Aplicada) e ANTP (Associação Nacional de Transportes Públicos), os acidentes de trânsito têm custos significativos para os cofres públicos e a sociedade, incluindo despesas hospitalares, reabilitação, atendimento policial, reparos de infraestrutura, prejuízos aos veículos e impactos emocionais. Esses custos abrangem uma ampla gama de áreas, desde cuidados médicos até consequências legais, evidenciando o impacto abrangente dos acidentes nas aglomerações urbanas brasileiras.

Conforme dados da PRF, em 2014 registrou-se 167.247 acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras, gerando 26.182 feridos graves e 8.233 vítimas fatais, o que custou para os cofres públicos mais de 12 bilhões de reais, desse montante mais de 60% oriundos de custos com as vítimas e mais de 37% custos com veículos, por danos materiais, perda de cargas e remoção de veículos. O maior custo recai sobre a perda de produção em relação às vítimas por motivos de afastamento ou sobrevida para produção de atividades econômicas na sociedade, relacionando-se com gastos de previdência social e empobrecimento das famílias, e em segundo lugar custos hospitalares.



DOI: [10.29327/1430212.49-83](https://doi.org/10.29327/1430212.49-83)

ESTUDO DE CASO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA ÁREA DE ESCAPE NA CURVA DA FERRADURA DA RODOVIA PR-170, EM PINHÃO/PR

Considerando uma média no custo unitário, os valores chegam a R\$ 261.689,00 por acidente, e em caso de morte aumentando consideravelmente para R\$ 664.821,00 por acidente.

Se tratando das rodovias estaduais e municipais do Brasil em 2014, o estudo IPEA estima que os custos com acidentes de trânsito ficaram na faixa de 24,8 a 30,5 bilhões de reais, ou seja, o custo dos acidentes nas vias urbanas, estaduais e federais impõe ao erário um grande empenho financeiro. Esses dados indicam sobretudo a necessidade constante de implementação de medidas preventivas, mitigadoras e melhorias na infraestrutura viária que protejam os usuários contra acidentes, assim como reforçar políticas públicas para educação, precaução, diminuição de quantidade de eventos de sinistros, bem como na redução da severidade deles, visto que impacta diretamente nos custos para a sociedade. Identificar pontos críticos, implementar melhorias na circulação e sinalização, e realizar intervenções de engenharia são essenciais para garantir uma infraestrutura rodoviária mais eficaz. A principal melhoria em análise, em relação ao objeto do estudo denominado “Curva da Ferradura”, localizado na rodovia PR-170 no município de Pinhão/PR, é a implantação de uma área de escape no final do declive do KM 467, seguido das melhoras nos dispositivos de sinalização. Cabe ressaltar, entretanto, que ainda que devidamente estudado e implantado, uma área de escape é dependente diretamente do fator humano, ou seja, mesmo que implantado, o funcionamento da melhoria dependerá da decisão do mesmo de utilizá-lo, para que a área possa funcionar efetivamente.

ABRANGÊNCIA DO ESTUDO DE UMA ÁREA DE ESCAPE

As primeiras áreas de escape com rampas de gravidade foram construídas nos EUA, e ao longo dos anos evoluíram para dispositivos mais seguros, como caixas de retenção com material solto, adaptáveis à topografia da estrada (SILVA, 2022). As rampas de escape devem ser construídas no alinhamento da estrada principal saindo para a direita da pista. (AASTHO, 2018). Como são posicionadas nas margens da via, devem ser feitas de preferência antes de curvas, em tangentes ou em alguns casos nas próprias curvas. Sendo que em curvas horizontais, é recomendado que a rampa seja implantada na continuidade da tangente, com o intuito de prevenir a entrada de veículos descontrolados na curva. Já nas tangentes horizontais, é importante estudar a forma de integrar as rampas à geometria já existente da estrada. Quanto maior for o ângulo ascendente da via de escape, menor será o comprimento necessário. (RODRIGUES *et al.*, 2023)

A AASTHO (2018) recomenda que uma pista de serviço adjacente à rampa deve ser implantada para que os veículos de manutenção possam adentrar a área. Esta faixa deve ser asfaltada, com sinalização clara para orientar o motorista sobre o eixo da rodovia e o acesso ao serviço, e deve ser localizada ao lado da caixa, com uma largura média de 3 metros, projetada de forma que o condutor não confunda a estrada de serviço com o leito de parada da rampa.

A presença de finos e sujeiras no decorrer do tempo resultam em uma redução na eficiência da caixa, sendo recomendável e indispensável acompanhar essa evolução para determinar o momento ideal para a realização da limpeza, escarificação e substituição do material.

Caixa de retenção

No interior da área de escape é feita uma caixa de retenção que utiliza agregados soltos para aumentar a resistência ao rolamento, desacelerar o veículo e manter ele no lugar após ter parado, onde a resistência ao gradiente atua no sentido de descida, oposto ao movimento do veículo (AASTHO,



Eleandro Campos Pereira,
Fernando Furiatti Saboia, Alexandre Castro Fernandes,
Lorena Nadine Baran, Thais Mazzure Pedroso,
Luis Felipe Carraro, Geovane Cardoso de Almeida

2018). Esta caixa deve ter um comprimento capaz de fazer com que toda a energia cinética resultante do veículo em movimento seja dissipada ao adentrar o dispositivo. (SILVA, 2022)

Os materiais utilizados no preenchimento devem apresentar características arredondadas, de tamanho único, serem de baixa compactação, com o mínimo índice de materiais granulométricos finos, serem resistentes ao rolamento e com baixa resistência ao cisalhamento. (SANTOS, 2022)

Por conta da eficiência e custo-benefício, utiliza-se a argila expandida, também chamada de cinasita, que permite que o trecho da área de escape seja mais curto, pois a desaceleração é quase imediata, garantindo a frenagem de veículos longos e pesados.

Faixa auxiliar

Deve ser prevista uma grande distância de visão antes da rampa para que o condutor em alta velocidade possa entrar com segurança. O ângulo de saída da rampa deve ser de 5 graus ou menos, com uma faixa auxiliar para que o motorista se prepare para entrar. Para utilizar estas áreas o condutor deve primeiro manter o veículo na faixa da direita e seguir a área vermelha demarcada que indica a entrada da área, e após isso deve se manter na faixa marrom que é a caixa de contenção onde o veículo irá perder velocidade até parar. (FREITAS *et al.*, 2021).

A estrada principal deve ser estendida até um ponto próximo ou além da saída de modo que as rodas dianteiras entrem no leito simultaneamente. (AASTHO, 2018). Em rodovias com várias faixas de rolamento é recomendado que haja uma faixa auxiliar com comprimento mínimo de 300m para acessar a caixa de retenção. De modo geral, para total funcionalidade e segurança nenhuma parte da rampa de escape deve ficar oculta à visão do condutor. (WITHEFORD, 1992)

Drenagem

Nesse tipo de projeto, a drenagem é extremamente importante para evitar a contaminação e compactação do material. Assim, é recomendável a adoção de um sistema de drenagem antes da entrada da caixa, com drenos nas bordas e subterrâneo, com saídas transversais. Para impedir a infiltração entre o agregado e a sub-base, pode ser usado geotêxtil ou pavimentação. Já para a base, a fim de reter contaminantes provenientes de um vazamento de óleo diesel, é aconselhável aplicar um pavimento de concreto (AASTHO, 2018). Diante disto, o projeto de drenagem deve ser feito separado do pluvial e feitas verificações regulares para que haja uma eficiência da rampa e o escoamento adequado. (RODRIGUES *et al.*, 2023)

Sinalização

Deve ser adotada sinalização clara e compreensível, de forma chamativa para possibilitar que os condutores as acessem sem dificuldade, com pinturas no pavimento e de forma vertical. Com isso, evita-se que os condutores confundam e entrem por engano na área de escape. E para os que precisarão utilizá-la terão a oportunidade de conduzir-se à uma área mais segura, procurando frear e manter o controle do veículo e preservar suas vidas, assim como as dos outros, evitando danos importantes aos veículos envolvidos (RODRIGUES *et al.*, 2023). Também deve haver sinalizações que proíbam os motoristas de estacionar ou parar nas proximidades, bem como durante a manutenção da área de escape com sinalização extras, indicando a não disponibilidade de uso. (ZANOLI, 2003)

DOI: [10.29327/1430212.49-83](https://doi.org/10.29327/1430212.49-83)ESTUDO DE CASO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA ÁREA DE ESCAPE
NA CURVA DA FERRADURA DA RODOVIA PR-170, EM PINHÃO/PR

PARÂMETROS ANALISADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DE ESCAPE

Quanto maior a velocidade de entrada do caminhão, maior a distância percorrida dentro da caixa e maior o tempo necessário para que o caminhão pare totalmente. (ZANOLI, 2003). Com isso, o dimensionamento da área de escape deve considerar as velocidades e distâncias de veículos desgovernados em diferentes greides descendentes.

A velocidade no início do segmento de rampa é determinada pelo limite de velocidade em que um veículo pode chegar antes de tombar, para isso, utilizando-se a equação (1) demonstrada por Ejzenberg (2009).

$$V_T = \sqrt{\frac{127R}{1,15} \cdot \left(b_r \cdot \frac{t}{2h} + e \right)} \quad (1)$$

Onde a velocidade limite de tombamento lateral (V_T) é dada em km/h e o raio de curvatura (R) em metros. O fator de calibração (b_r) baseado nos estudos de Bonneson (2000), assume valores típicos entre 0,4 e 0,8, podendo ser considerado a média entre eles de 0,6. A superelevação na curva (e) é dada em m/m através da verificação in loco na curva analisada. Já a largura da bitola (t) é estimada por Gillespie (1992, p.312 *apud* VIAPIANA, 2020) em 1,9m para caminhões médios que também pode ser medida ou retirada dos dados do fabricante do veículo. Ejzenberg (2009) determina a altura do centro de gravidade total do veículo em relação ao solo (h), em metros, considerando tanto o caminhão vazio quanto carregado, através da equação (2):

$$h = (m_v \cdot h_v) + (m_c \cdot h_c) / (m_v + m_c) \quad (2)$$

Onde:

 m_v = massa do veículo (T) m_c = massa da carga (T) h_v = altura do centro de gravidade do veículo (m) h_c = altura do centro de gravidade da carga (m)

Outra forma, citada por Ejzenberg (2009), considera os veículos totalmente carregados, gerando alturas superestimadas, através da equação (3):

$$h = \frac{(h_{total} + h_{base})}{2} \quad (3)$$

Onde:

 h = altura do centro de gravidade do semi-reboque em relação ao solo (m) h_{base} = altura da base de carga (a plataforma do reboque) em relação ao solo (m) h_{total} = altura total do reboque em relação ao solo (m)

Tendo a velocidade de tombamento pode-se calcular a velocidade no final do segmento de rampa, que será a máxima velocidade que o veículo chegará no início da caixa de cinasita, demonstrada pela Arteris (2018), através da equação (4):

$$V_f^2 = V_i^2 - 254 \cdot \Delta L \cdot (R \pm G) \quad (4)$$



Eleandro Campos Pereira,
Fernando Furiatti Saboia, Alexandre Castro Fernandes,
Lorena Nadine Baran, Thais Mazzure Pedroso,
Luis Felipe Carraro, Geovane Cardoso de Almeida

Onde: V_i = velocidade no início do segmento (km/h) velocidade de tombamento
 V_f = velocidade no final do segmento (km/h)

ΔL = comprimento do segmento percorrido (m) R = resistência de rolamento do material (m/m)

G = greide do segmento de rampa (m/m)

A desaceleração que o veículo irá sofrer é dependente da velocidade de entrada no dispositivo, de acordo com as propriedades de rolamento do material de preenchimento da caixa de retenção, a profundidade dela e a inclinação da rampa. (SILVA, 2022)

Para calcular a velocidade de entrada, é necessário considerar que os freios do veículo estejam inoperantes, analisando as forças que atuam no veículo em uma descida. A AASHTO (2018) recomenda utilizar para velocidades de entrada o intervalo de 130 a 140km/h mesmo que a velocidade máxima que os veículos acessam a rampa seja aproximada. Em terrenos onde o comprimento da rampa é limitado, podem ser implantados barris preenchidos com água ou material semelhante para oferecer uma última chance de parada aos veículos desgovernados. (WITHEFORD, 1992)

A desaceleração dos veículos na área de escape depende da velocidade de entrada, das propriedades do material de preenchimento da caixa de retenção, da profundidade e da inclinação da rampa. Foram desenvolvidos dois modelos para calcular o comprimento ideal para a caixa de retenção. O modelo matemático proposto pela Roads and Traffic Authority – RTA, da província de Queensland, na Austrália (REIS; PEDRINI, 2023), consiste em determinar o comprimento da caixa através da seguinte fórmula (5):

$$L = \frac{V^2}{(26a + 2,55X)} \quad (5)$$

Onde:

L: Comprimento da caixa de retenção, excluindo os 50 metros iniciais (m); V : Velocidade de entrada na caixa de cinasita (km/h);

A: Desaceleração

X: Inclinação do dispositivo (%).

Os primeiros 50m são excluídos do cálculo do comprimento pois já são considerados para a zona de transição na profundidade da caixa de retenção.

Segundo a AASHTO levando em consideração a inclinação da caixa de retenção e a resistência de rolamento do material de preenchimento, o comprimento é calculado pela fórmula (6):

$$L = \frac{V^2}{254(R \pm G)} \quad (6)$$

Onde:

L: Comprimento da caixa de retenção (m);

V: Velocidade de entrada no dispositivo (km/h);



DOI: [10.29327/1430212.49-83](https://doi.org/10.29327/1430212.49-83)

ESTUDO DE CASO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA ÁREA DE ESCAPE NA CURVA DA FERRADURA DA RODOVIA PR-170, EM PINHÃO/PR

R: Coeficiente de rolamento do material de preenchimento; G: Porcentagem de inclinação utilizada na caixa dividida por 100.

A largura da rampa deve permitir acomodar mais de um veículo simultaneamente, sendo recomendada uma largura mínima de 8m, mas preferencialmente entre 9m e 12m. (AASTHO, 2018). Uma pista de serviço ao lado esquerdo e/ou direito da caixa é necessária para manutenção e retirada de veículos, com uma largura média de 3 a 5m. A profundidade dos primeiros metros da caixa de retenção deve ser menor para evitar o afundamento das rodas dos veículos, minimizando os impactos de uma desaceleração brusca e facilitando sua remoção.

Como não há uma regra para definir a profundidade exata da caixa de retenção, cada estudo realizado dá suas diretrizes pra esse dimensionamento. O estudo de Witheford (1992) não recomenda a profundidade maior que 45cm. Já a AASHTO (2018) recomenda uma profundidade inicial de 7,5cm e entre os 30 a 60m alcance a profundidade mínima total de 100cm tornando-se constante ao longo do dispositivo.

A análise feita nos EUA sugere profundidades mínimas de 30cm, recomendando que no início da caixa de retenção a profundidade seja de 15 cm e no trecho entre 30 a 60 m de comprimento a profundidade variando entre 46 a 90 cm. (ZANOLI, 2003)

Na Austrália recomenda-se que nos primeiros 50m da caixa de retenção aumente gradualmente de 0 até 35cm, onde esse trecho tem como finalidade amenizar os efeitos da desaceleração, proporcionando conforto durante a frenagem. Posteriormente são 100m de profundidade constante de 35cm, seguindo nos próximos 25m a transição até 45cm. (ZANOLI, 2003)

Áreas de escape no Brasil

A ausência de normas no país faz com que seja necessário utilizar os parâmetros estrangeiros como base para a tomada de decisão da localização, geometria, materiais, sinalização e manutenção desses dispositivos. Com isso, atualmente, são encontradas poucas áreas de escape nas rodovias brasileiras. A primeira área de escape com caixa de retenção foi implantada em 2001, no Km 42,6 da SP-150 da Via Anchieta, em São Paulo.

A segunda foi feita no ano de 2011 no km 671,7 da BR-376 em Guaratuba no Paraná. Esta área de escape também conta com tambores cheios de água para auxiliar na contenção dos veículos e não possui pórtico como a do Km 667,3. (RODRIGUES *et al.*, 2023)

A terceira área também está disposta na SP-150 da Via Anchieta em São Paulo desde 2014, e se encontra no Km 49 da rodovia.

A quarta foi implantada em 2018 no Km 37,9 da BR-277, sentido litoral na região da Serra do Mar, em Morretes-PR, composta por uma caixa preenchida com cinasita.

A quinta foi inaugurada em 2018 e está localizada no km 353 da BR-116/SP, rodovia Régis Bittencourt Serra do Cafezal, entre as cidades de Miracatu e Juquitiba.

A sexta encontra-se na BR-146 no Km 87 em Serra do Salitre-MG, implantada no ano 2019. Conhecida por um declive sinuoso, fica próxima ao município de Araxá (MG), tendo a caixa de retenção preenchida de cascalho.

A sétima foi Inaugurada em novembro de 2019 na BR-376, no Km 667,3, em Guaratuba-PR. Ela conta com uma caixa de retenção de 150 metros, com 1,5 metros de profundidade, sendo 20 cm de



Eleandro Campos Pereira,
Fernando Furiatti Saboia, Alexandre Castro Fernandes,
Lorena Nadine Baran, Thais Mazzure Pedroso,
Luis Felipe Carraro, Geovane Cardoso de Almeida

macadame seco, 10 cm de brita graduada simples e o restante de cinasita, tendo também duas faixas laterais para operação e transbordo (ARTERIS, 2020). Também possui uma inovação que é o pórtico rolante utilizado para remover os veículos que é uma estrutura automatizada apoiada por duas pontes rolantes com trilhos que se estendem por toda a área de escape, tendo capacidade de movimentar até 70 toneladas de carga e operada por uma equipe de até cinco pessoas e que utilizam controles remotos para movimentar a estrutura que permite a remoção mais rápida do veículo sinistrado.

A oitava área de escape foi implantada em 2022 e fica no trecho entre a BR-040 e o trevo do bairro Betânia, km 541, chamada de “descida do Betânia”.

Através do programa *Google Earth* e juntamente com dados obtidos por pesquisas, obteve-se as estimativas da Tabela 1, a seguir, que faz a comparação entre as características das áreas de escape presentes no Brasil.

Tabela 3. Características das áreas de escape no Brasil. Elaborada pelos autores.

Rodovia	SP-150	SP-150	BR-376	BR-376	BR-277	BR-116	BR-146	BR-040
Km	42,6	49	671,7	667,3	37,9	353	87	541
Comprimento do taper (m)	70	60	90	455	25	345	35	50
Comprimento da faixa auxiliar (m)	-	-	30	50	100	-	40	50
Comprimento caixa de retenção (m)	85	85	120	150	175	130	130	120
Largura da caixa de retenção (m)	5	5	5	5	5	5	5	5
Largura da pista de serviço (m)	3,5	5	3	5	5	3	3,5	3,5
Profundidade (m)	1	1,2	1,2	1,5	-	1,1	-	0,9
Material de preenchimento	Cinasita	Cinasita	Cinasita	Cinasita	Cinasita	Cinasita	Cascalho	Cinasita

ESTUDO DE CASO NA RODOVIA PR-170 EM PINHÃO/PR

A PR-170 entre os municípios de Pinhão e Bituruna é uma rodovia estadual implantada na década de 80 em parceria e convênio com a Companhia de Energia Copel, projetada em pista simples. A chamada “Curva da Ferradura”, como é conhecida na região em razão do seu formato, conforme a Figura 1, situa-se no KM 467 da PR-170, coordenadas UTM SIRGAS 2000 (433316.00 m E, 7124647.00 m S).

Próximo ao local está a Usina Hidrelétrica Governador Bento Munhoz Rocha Netto – Foz Areia, na bacia do Rio Iguaçu. Esse segmento é marcado por declives acentuados e longos, apresenta relevo montanhoso, com várias sequências de curvas horizontais que demandam ao condutor tomar muita atenção para visibilidade, redução na velocidade e cuidado na direção.



DOI: [10.29327/1430212.49-83](https://doi.org/10.29327/1430212.49-83)

ESTUDO DE CASO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA ÁREA DE ESCAPE
NA CURVA DA FERRADURA DA RODOVIA PR-170, EM PINHÃO/PR



Figura 1. Curva da Ferradura (GOOGLE MAPS, 2024).

De acordo com os dados da Polícia Rodoviária Estadual e a Coordenadoria de Engenharia de Tráfego e Segurança Rodoviária - DER/PR, a rodovia PR-170 nesse ponto é marcado reincidência de acidentes são eles, eventos de tombamentos/capotamentos, onde se situa a Curva da Ferradura. Isto se deve em vista da grande sinuosidade e pela curva anteceder um declive acentuado. O trecho em questão é denominado “170S0570EPR – de AC. PINHÃO para BARRAGEM FOZ DO AREIA (A)” com extensão de 41,24 km, se inicia no KM 427,96 ao 469,20, como mostra a Figura 2.

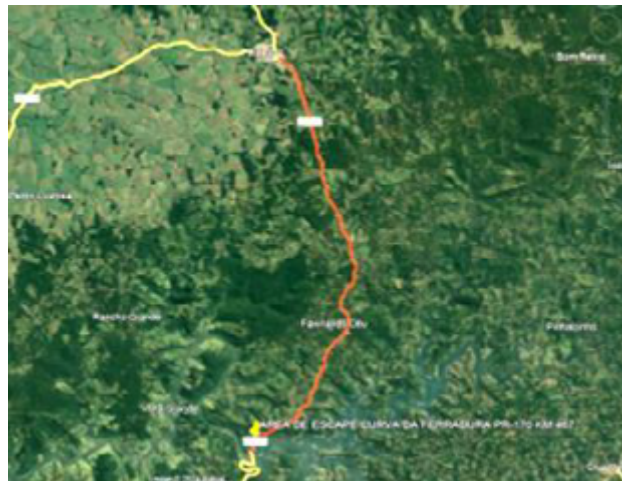


Figura 2. Curva da Ferradura (GOOGLE EARTH, 2024).

Foram analisados o número de acidentes nesse trecho por quilômetro, o tipo do acidente, e a quantidade de envolvidos, de óbitos e de feridos no período de 2018 até 2024. Observou-se que na extensão total do trecho, com 41,24 quilômetros, em todos os últimos 7 anos analisados, aconteceram acidentes no KM 467 em sua quase totalidade por tombamento e/ou capotamento; sendo este KM em específico o ponto mais citado com mais eventos apresentados em todos os períodos.

No total de todo período analisado foram registrados 36 acidentes por tombamento, choque ou capotamento no KM 467, o que envolveu 48 pessoas, com 16 feridos e 4 mortes. Desses acidentes, mais de 11% registraram-se com óbitos, representando um índice significativamente alto.



Eleandro Campos Pereira,
Fernando Furiatti Saboia, Alexandre Castro Fernandes,
Lorena Nadine Baran, Thais Mazzure Pedroso,
Luis Felipe Carraro, Geovane Cardoso de Almeida

Definida por arco de aproximadamente 180°, essa curva obriga o condutor a manter condições de equilíbrio de forças durante todo o seu desenvolvimento por um considerável período de tempo. Possui um declive longitudinal que a antecede, de aproximadamente 400 metros e inclinação 9%, prosseguido por uma curva suave à direita no KM 467,26, chegando em seguida até a curva da ferradura à esquerda no Km 467,440.

Quando os limites de velocidade e sinalização não são respeitados, falhas no sistema de freios de veículos pesados podem ocorrer, levando a excesso de velocidade, perda de controle, manobras evasivas, derrapagem e tombamento.

É fato que os principais motivantes a incidentes nesse local são o relevo com a longa rampa descendente e o greide acentuado, que causam o aumento natural da velocidade pela ação da gravidade, os pequenos raios das curvas horizontais, aliados à sobrecarga na frenagem, veículos com carga excessiva e/ou imprudência dos motoristas. Medidas preventivas são exigidas pelos usuários da rodovia e moradores da região devido ao alto índice de acidentes no local.

A equipe técnica do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná – DER – Superintendência dos Campos Gerais elaborou um anteprojeto para implantação da área de escape no local em questão utilizando como base os modelos de áreas de escape existentes no Brasil, bem como a literatura atual.

RESULTADOS

Para dimensionar o dispositivo, foram considerados parâmetros como a velocidade diretriz da via de 80 km/h, o raio da curva horizontal de 240m, a rampa máxima de 9,04% e a superelevação máxima de 6,20%. Com base na topografia local, a caixa de retenção pode atingir 101m de comprimento, sendo necessário verificar sua capacidade de parar os veículos desgovernados de forma segura.

Para calcular a altura do centro de gravidade do veículo em relação ao solo (h), considerou-se a altura máxima legal do veículo de 4,4m, carregado com metade da sua capacidade de carga, com a altura de base da carga de 1,4m acrescida de 0,75m, resultando em uma altura de 2,15m.

A velocidade máxima da curva no KM 466+800 é calculada como a velocidade de tombamento, considerando o fator de calibração de 0,6 e bitola do veículo de 1,9m, resultando em 93,11 km/h pela equação (4).

A velocidade em que o veículo chega no final da rampa que antecede a “curva da ferradura” será a velocidade com que ele entrará na área de escape, com isso, tendo o comprimento de rampa de 400m, com uma inclinação de 9,04% e resistência de rolamento do material do leito – concreto asfáltico - de 0,012 m/m, e utilizando a velocidade inicial na rampa como sendo a velocidade de limite de tombamento de 93,11km/h, obteve-se a velocidade final de 128,987km/h.

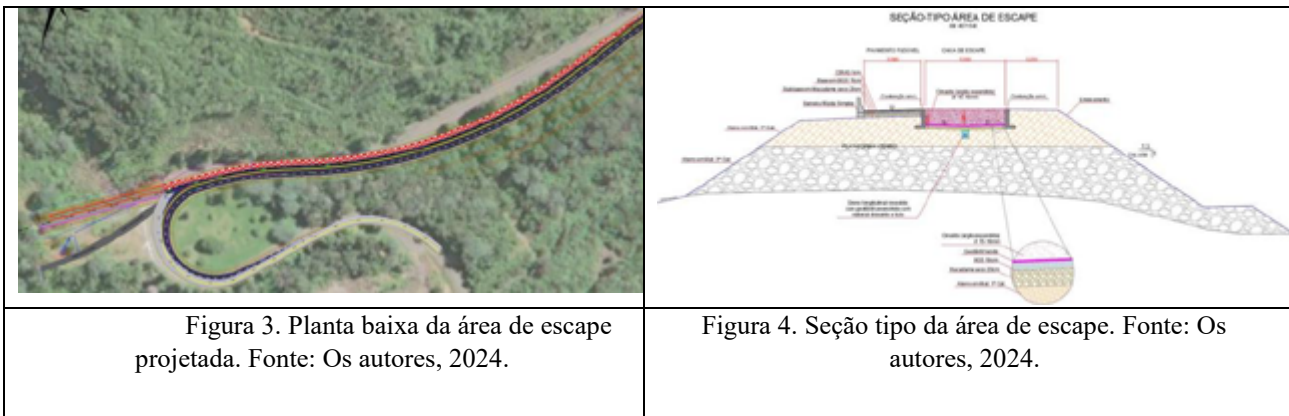
Para verificar o comprimento da caixa de cinasita, calculou-se a redução de velocidade atingida pelo veículo ao percorrer os 101m, utilizando o modelo da AASHTO. Considerando o coeficiente de rolamento do material de preenchimento – cinasita – de 0,577 e a inclinação de 5,77%, tem-se a velocidade de 127,60km/h.

Assim sendo, no ponto de entrada da caixa com 128,987 km/h, ao percorrer os 101m da caixa projetada, o veículo tipo resultaria na velocidade residual de 1,38 km/h, considerada nesse caso irrisória, visto que os cálculos e fatores adotados são superestimados e que, historicamente, os veículos conseguem reduzir a velocidade rapidamente, parando antes do final da caixa de escape. Admitiu-se uma faixa auxiliar/taper de 445 metros antecedendo a caixa de escape, em pavimento flexível, com sinalização horizontal em formato xadrez, nas cores branco e vermelho, com largura de

DOI: [10.29327/1430212.49-83](https://doi.org/10.29327/1430212.49-83)ESTUDO DE CASO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA ÁREA DE ESCAPE
NA CURVA DA FERRADURA DA RODOVIA PR-170, EM PINHÃO/PR

3,50 metros. Também foi previsto um pavimento final após a caixa com extensão de 9,00 metros, para auxílio na retirada dos veículos e na manutenção.

Para a área de escape foi considerado estrutura em aterro atendendo uma inclinação, limitada por barreiras rígidas de concreto. Entre o espaço da caixa e da faixa pavimentada foi adotado contenção de concreto armado. Para a caixa de cinasita após a camada final de terraplenagem, adotou-se uma camada de 20 cm de macadame seco, seguido de 10 cm de brita graduada simples, manta geotêxtil tecido e por fim preenchimento da caixa com argila expandida, com profundidade gradual variável até 1,20 m. Dentro da caixa aplicou-se inclinação de 4% das laterais para o centro da caixa, com dreno longitudinal até caixa coletora, de modo a permitir a drenagem adequada dos líquidos perigosos. O anteprojeto pode ser observado na Figura 3 e 4, a seguir.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ainda que hoje a literatura é escassa e recente, as aplicações das áreas de escape do Brasil estão sendo realizadas e, através disso, entende-se a importância da definição de parâmetros para adequada implantação. Esses dispositivos cada vez mais demonstram sua utilidade e funcionalidade em rodovias brasileiras, visto que impactam diretamente em salvar vidas no trânsito, além de a viabilidade técnico-econômica apresentar grandes benefícios, especialmente ao se desviar do altíssimo custo de um acidente de trânsito nas rodovias, principalmente as estaduais.

Embora não haja especificações ou normativas oficiais publicadas no Brasil, a necessidade de implantações de dispositivos de segurança, como as áreas de escape, em pontos críticos e específicos de rodovias faz com que abra caminho para serem desenvolvidas. O estudo de caso para a PR-170 foi uma situação específica e potencial para a aplicação de uma área de escape, visto ser uma curva com grande declive, seguida de curva horizontal em quase 360°, com grande potencial para trazer bons resultados. Em síntese, os dados apresentados destacam a urgência de implementar medidas preventivas e de melhoria na infraestrutura viária para proteger os usuários contra acidentes.

Ao priorizar obras e intervenções de engenharia, não apenas se atende às necessidades imediatas, mas também se garante a sustentabilidade da rede viária a longo prazo, além de preservar vidas.

Enfim, conclui-se que o estudo apresenta dados pertinentes para a tomada de decisão no trecho em questão, e a solução encontrada pode ser utilizada como suporte para projeção de novos dispositivos de área de escape nas rodovias brasileiras, servindo assim como modelo de referência.



Eleandro Campos Pereira,
Fernando Furiatti Saboia, Alexandre Castro Fernandes,
Lorena Nadine Baran, Thais Mazzure Pedroso,
Luis Felipe Carraro, Geovane Cardoso de Almeida

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**. American Association of State Highway and Transportation Officials. 2018.
- ARTERIS. **Nova Área de Escape da BR-376**. Joinville, 21, 2020. Disponível em: <<https://www.arteris.com.br/fiquepor-dentro/noticias-e-releases/nova-area-de-escape-da-br-376/>> Acesso em: dez. 2023.
- ARTERIS. **Projeto Executivo de Engenharia Rodoviária Para Área de Escape - km 667+300, BR-376/PR - Volume 1**. Outubro, 2018.
- BONNESON, J. A. **Superelevation distribution methods and transition designs**. Washington, D.C.: NCHRP – National Cooperative Highway Research Program/TRB – Transport Research Board, 2000.
- CONTINENTAL. **Perigos do Superaquecimento dos Freios**. São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://www.conti.com.br/newsroom/newsroom-truck-and-bus/perigos-superaquecimento-freios/>> Acesso em: jan. 2024.
- EJZENBERG, S. **Os Veículos Pesados e a Segurança no Projeto das Curvas Horizontais de Rodovias e Vias de Trânsito Rápido**. São Paulo, SP, Brasil: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, 2009. 245p.
- FREITAS, A. D.; SILVA, E. S.; ASSIS, M. C.; SANTANA, R. E. **Áreas de Escape e Seus Benefícios na Malha Rodoviária Brasileira**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Universidade UNA de Catalão – Campus Santa Cruz, 2021.
- IPEA - Instituto De Pesquisa Econômica Aplicada; ANTP - Associação Nacional de Transportes Públicos. **Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas aglomerações urbanas**. Brasília, 2003.
- REIS, G. F.; PEDRINI, J. B. **Segurança viária: análise de critérios técnicos para tomada de decisão de implantação de área de escape**. Projeto Multidisciplinar para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Infraestrutura Urbana. Instituto Federal Do Espírito Santo. Vitória, ES. 2023.
- RODRIGUES, E. S.; PENA, F. S.; MELO, J. O.; ROSA, D. J. Q. **Rampa de Escape**. Revista Paramétrica, v. 15, n. 1, jan./jul. 2023.
- SANTOS, D. L. G. **Análise do projeto geométrico e propostas de intervenções na rodovia BR-364, trecho Serra de São Vicente**. Trabalho de Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal De Mato Grosso. Cuiabá, MT. 2022.
- SILVA, R. A. **Estudo de eficiência das áreas de escape e seu impacto na queda da acidentalidade relacionada a transporte de cargas pesadas: estudo de caso ERS-431**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, 2022.
- VIAPIANA, C. **Método para determinação de limite de tombamento lateral estático e margem de segurança de veículos pesados em curvas: estudo de caso da ERS-122**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2020.
- WITHEFORD, D. K. **Truck Escape Ramps**. NCHPR Synthesis 178, Transportation Research Board, National Research Council, Washinton, DC, 1992.
- ZANOLI, P. R. **Área de escape para caminhões desgovernados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.



ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ROCHOSO NA MG-120, KM 147, POR MEIO DE TELA METÁLICA E CHUMBADORES SISTEMÁTICOS: ESTUDO DE CASO

Rosemberg Ferreira Nunes¹; Flávia Lima Costa¹; Dionisio Tadeu de Azevedo¹, Camila Hilário Bethonico¹ & Roberto Navarro de Castro¹

RESUMO

O estudo de caso apresenta uma proposta para estabilização do talude rochoso do km 147 da Rodovia MG-120, sob jurisdição do DER-MG, em Água Boa, Minas Gerais, devido aos frequentes desprendimentos de blocos rochosos que representam riscos aos usuários da rodovia. Após avaliação de diversas soluções, a escolha recaiu sobre o revestimento do talude com tela metálica de alta resistência. A metodologia envolveu inspeções de campo, mapeamento geológico-geotécnico, análises de estabilidade e dimensionamento do sistema de estabilização. O talude em estudo apresentou-se muito heterogêneo no que diz respeito ao grau de fraturamento em diferentes segmentos, sendo necessária a abordagem diferenciada para cada área. As principais instabilidades identificadas foram rupturas de blocos rochosos e passagem desordenada de águas pluviais. As análises de estabilidade indicaram a formação de cunhas como o cenário mais provável de ruptura. O projeto de estabilização consistiu na instalação de sistemas de revestimento estabilizador com tela metálica de alta resistência e chumbadores sistemáticos em diferentes trechos do talude, seguindo parâmetros e critérios preconizados em normas. O dimensionamento dos chumbadores foi realizado considerando a resistência do maciço rochoso e as condições geométricas do talude. Os resultados demonstraram que o sistema proposto atinge fatores de segurança satisfatórios, conforme normativas vigentes, garantindo a estabilidade do talude e a segurança da rodovia. Essa abordagem metodológica destaca a importância da integração entre geologia e engenharia na mitigação de riscos em obras de estabilização de taludes rochosos.

PALAVRAS-CHAVE: Rodovia; Talude; Rochoso; Estabilização.

ABSTRACT

The case study presents a proposal for stabilizing the rocky slope at kilometer 147 of Highway MG-120, under the jurisdiction of DER-MG, in Água Boa, Minas Gerais, due to frequent rock block detachments that pose risks to highway users. After evaluating various solutions, the choice fell on lining the slope with high-strength metal mesh. The methodology involved field inspections, geological-geotechnical mapping, stability analyses, and sizing of the stabilization system. The slope under study was highly heterogeneous regarding the degree of fracturing in different segments, requiring a differentiated approach for each area. The main instabilities identified were rock block ruptures and disorderly passage of rainwater. Stability analyses indicated the formation of wedges as the most likely scenario for rupture. The stabilization project consisted of installing stabilizing lining systems with high-strength metal mesh and systematic anchors in different sections of the slope, following parameters and criteria recommended in standards. Anchor sizing was carried out considering the strength of the rock mass and the geometric conditions of the slope. The results demonstrated that the proposed system achieves satisfactory safety factors, according to current regulations, ensuring the stability of the slope and the safety of the highway. This methodological approach highlights the importance of integration between geology and engineering in mitigating risks in rock slope stabilization works.

KEY WORDS: Highway; Slope; Rocky; Stabilization.

¹ Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, rosemberg.nunes@der.mg.gov.br; flavia.costa@der.mg.gov.br; dionisio.azevedo@der.mg.gov.br; camila.bethonico@der.mg.gov.br; roberto.castro@der.mg.gov.br.



INTRODUÇÃO

O presente estudo de caso aborda a elaboração de projeto para estabilização de taludes rochosos, focando especificamente em um talude existente no km 147 da Rodovia MG-120, no município de Água Boa em Minas Gerais.

Neste local, há constantemente desprendimentos de blocos rochosos, que rolam até a rodovia, oferecendo risco aos usuários, sendo necessária a definição de uma solução de contenção deste talude para proteção da rodovia.

Foram avaliadas soluções como desmonte de rocha, execução de variante à jusante, execução de muro como barreira de proteção e a utilização de revestimento do talude com tela metálica, sendo essa última a escolhida para a situação em questão, por apresentar agilidade de execução, sem necessidade de interrupção total da via e por sua assertividade.

O DER-MG atuou na identificação do problema, visita e inspeções de campo e contou com auxílio de uma empresa especialista para o dimensionamento da solução. A proposta de estabilização conta com utilização de sistemas de revestimento estabilizador com tela metálica de alta resistência e chumbadores sistemáticos. Essas soluções, dimensionadas de acordo com os modelos geomecânicos específicos, visam garantir a segurança e a estabilidade dos taludes, considerando os requisitos regulamentares e atendendo aos fatores de segurança preconizados em normas.

A abordagem metodológica adotada neste estudo de caso demonstra a importância da integração entre geologia e engenharia para a análise e mitigação de riscos em obras de estabilização de taludes, especialmente em ambientes rochosos complexos.

ESTUDO DE CASO

Metodologia

O estudo de estabilização de taludes rochosos foi desenvolvido considerando as seguintes etapas:

- Inspeções de campo para caracterização geológica e geotécnica do talude, realizadas em 05/2023;
- Mapeamento geológico-geotécnico do maciço rochoso com determinação das características das fraturas: direção (bússola), espaçamento, Coeficiente de rugosidade JRC, Resistência à compressão da junta JCS (ensaios de Martelo Schmidt), grau de alteração, abertura e material de preenchimento de junta;
- Investigação topográfica da área;
- Sobrevôo com VANT e registros fotográficos aéreos (Drone) e registros fotográficos de detalhe;
- Análises de estabilidade do talude em condições críticas de resistência e saturação, através de softwares;
- Proposta de solução com utilização da técnica de grampeamento do talude rochoso com utilização de tela de alta resistência e grampos ancorados.

Inspeções de campo e avaliação geotécnica do talude

Durante as inspeções, foram avaliadas as condições geotécnicas do talude rochoso. O maciço apresenta cerca de 70,0 m de extensão com altura variável de até 26,0 m e inclinação vertical, sendo constituído essencialmente de rocha do tipo gnaisse migmatítico com estruturas geológicas do tipo juntas de alívio e fraturas sub-horizontais e sub-verticais.



DOI: 10.29327/1430212.49-82

ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ROCHOSO NA MG-120, KM 147,
POR MEIO DE TELA METÁLICA E CHUMBADORES SISTEMÁTICOS:
ESTUDO DE CASO

O talude apresenta qualidade mecânica variando de Classe II para maciço de qualidade mecânica boa a Classe IV para o maciço mais fraturado e alterado, conforme Sistema de Classificação RMR – *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1989).

A Figura 1 ilustra os aspectos gerais do corte. O trecho inicial do talude apresenta qualidade mecânica média na parte inferior e média a ruim na parte superior com alto grau de fraturas horizontais e sub-verticais pouco espaçadas e graus de alteração variáveis. Este segmento inicial do talude será apresentado de agora em diante como “Área 1”.

A transição do trecho inicial para o trecho final do talude apresenta variação de qualidade geomecânica, sendo o trecho final composto de uma camada muito fraturada na crista, chamada de “Área 3”, seguida logo abaixo por uma camada maciça e outra camada fraturada na base do talude, denominada “Área 2”. A Área 3 é considerada mais crítica por possuir uma camada espessa muito fraturada em condições instáveis com direção de mergulho para a pista. Além dos maiores graus de alteração e fraturamento em relação ao restante do talude, a crista apresenta crescimento de vegetação no interior das fraturas mais alteradas.

As evidências da instabilidade do talude são observadas através das cicatrizes visíveis no corte e das quedas dos blocos de rocha que se desprendem. Esses eventos representam um potencial perigo para os usuários da via. Na (ADAPTADO DE GEOPHI ENGENHARIA, 2023).

Figura 2, podem ser vistos alguns blocos que caíram ou rolaram na pista de rolamento, os quais foram posteriormente removidos pela equipe de manutenção da rodovia.



Figura 1. Aspectos gerais do talude rochoso, com a delimitação das áreas em função do grau de fraturamento (ADAPTADO DE GEOPHI ENGENHARIA, 2023).

Figura 2. Blocos de rocha que desprenderam do talude e atingiram a pista (OS AUTORES, 2023).

Mapeamento Geológico-Geotécnico das Fraturas

Dentre as informações levantadas em campo, destacam-se os graus de alteração, coerência e de fraturamento do maciço rochoso e as condições das estruturas geológicas, sendo realizadas medições de orientação das fraturas do maciço rochoso (direção e mergulho) com bússola profissional (Figura 3), rebotes das paredes das fraturas através de ensaios com Martelo Schmidt (Figura 4) e coeficientes



de resistência à compressão uniaxial (JCS) e de rugosidade (JRC), espaçamentos, aberturas e presença de material de preenchimento das fraturas.



Figura 3. Medição da orientação das fraturas com bússola profissional de geólogo (GEOPHI ENGENHARIA, 2023).
Figura 4. Ensaio com Martelo Schmidt para medição de rebote e avaliação da qualidade mecânica do maciço (GEOPHI ENGENHARIA, 2023).

Os valores de rebote obtidos com os ensaios com Martelo Schmidt variaram entre 44 e 54, tanto para o maciço quanto para as paredes de fraturas pouco ou não alteradas, indicando qualidade mecânica média a boa da rocha. Para maciço e fraturas medianamente alteradas, os valores médios de rebote do martelo variaram de 18 e 20, indicando perda de resistência de compressão de 38%.

A Tabela 1 resume as principais estruturas geológicas aferidas e suas respectivas orientações, mapeadas no talude. Ressalte-se que foram realizadas 47 medições de fraturas, as quais foram estatisticamente tratadas, resultando em 10 famílias de juntas principais (J1 a J10).

Tabela 1. Orientação das principais famílias de juntas do Talude (GEOPHI ENGENHARIA, 2023).

Estrutura	Orientação (Mergulho/ Direção de mergulho)
J1	70° / 145°
J2	70° / 104°
J3	31° / 050°
J4	38° / 010°
J5	67° / 046°
J6	68° / 212°
J7	78° / 239°
J8	51° / 243°
J9	61° / 271°
J10	56° / 318°

Resumo dos Problemas

As principais instabilidades potenciais identificadas no talude são:

- Rupturas do tipo cunha e planar de blocos rochosos formados pela intersecção das fraturas do maciço rochoso, as quais podem produzir quedas de blocos na direção da rodovia;



DOI: [10.29327/1430212.49-82](https://doi.org/10.29327/1430212.49-82)

ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ROCHOSO NA MG-120, KM 147,
POR MEIO DE TELA METÁLICA E CHUMBADORES SISTEMÁTICOS:
ESTUDO DE CASO

- Passagem desordenada de águas pluviais com carreamento de sedimentos para a pista de rolamento.

ANÁLISES DA ESTABILIDADE DO TALUDE

Para análises do talude rochoso e dimensionamento do sistema de contenção foram utilizados três softwares com funções distintas, que são o DIPS e o SWEDGE, da Rocscience Inc., para análises da situação atual do talude, e o MACRO 1, da Maccaferri, para dimensionamento da solução, os quais serão descritos adiante.

As análises de estabilidade foram realizadas considerando as famílias de estruturas geológicas mapeadas no campo e as condições geométricas do talude. Detectadas as juntas/fraturas críticas para a instabilização do talude, foram analisadas as condições mais críticas de ruptura, sendo identificada a ruptura em cunha como mais provável para o talude em questão.

As 10 estruturas geológicas mapeadas e apresentadas anteriormente na Tabela 1 foram analisadas em relação à orientação média do talude com direção 90°/215°.

O Programa DIPS foi adotado para análises de projeções estereográficas das fraturas críticas em relação ao talude, que se baseia no Método de Fisher. As projeções estereográficas permitiram concluir que a formação de cunhas é crítica nas análises de estabilidade geométrica do talude.

As análises de estabilidade das cunhas de ruptura potenciais no maciço rochoso foram realizadas considerando a orientação do talude e parâmetros geométricos que privilegiam análises mais conservadoras e a favor da segurança, tais como espaçamento de juntas igual a 2,0 m, largura de crista igual a 3,0 m e inclinação nula de topo.

As fraturas críticas para a estabilidade foram selecionadas e correspondem às Juntas 1 a 10, apresentadas anteriormente na Tabela 1. Foram adotadas propriedades mecânicas reduzidas para as paredes das fraturas: coesão da junta nula e ângulo de atrito de 30°, correspondendo, portanto, a um cenário pessimista que penaliza os parâmetros de resistência das fraturas no maciço rochoso.

As análises de estabilidade das cunhas foram desenvolvidas com o programa SWEDGE, considerando condições de saturação distintas: 1 - Talude seco; 2 - Fraturas com preenchimento parcial de água (50% de saturação), e fraturas totalmente preenchidas com água (100% de saturação).

As análises de estabilidade de cunhas para o talude foram realizadas considerando 45 combinações de juntas, a fim de se identificar a formação de cunhas estáveis e instáveis e seus respectivos pesos e dimensões. A Figura 5 ilustra as análises feitas pelo software SWEDGE das cunhas instáveis formadas no talude, apresentadas em vistas de topo, frontal, perspectiva e seção transversal.

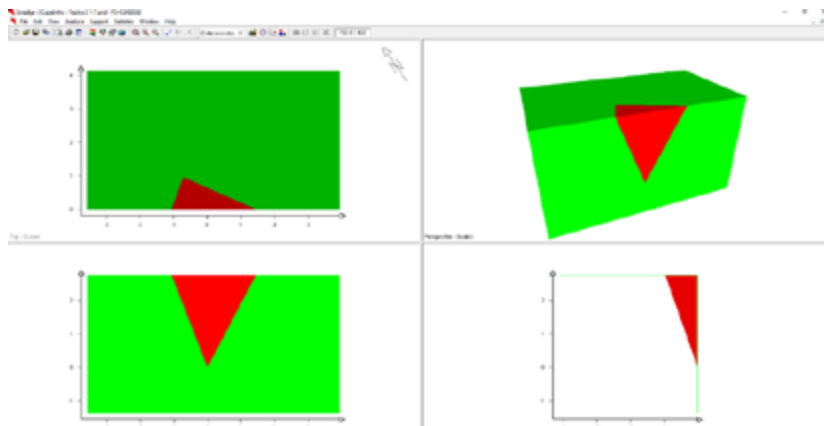


Figura 5. Análise da cunha instável formada pelas juntas J1 e J7 no talude (GEOPHI Engenharia, 2023).



Os principais resultados são sumariados em tabelas considerando:

- Combinação de juntas que formam cunhas;
- Peso das cunhas;
- Fatores de segurança na condição mais crítica correspondente às juntas completamente preenchidas com água (100% de saturação);

A Tabela 2 resume os principais resultados obtidos das análises de formação e estabilidade de cunhas, considerando 100% de saturação. A Tabela 2 mostra que a intersecção das juntas do maciço rochoso forma 18 tipos de cunhas que interceptam a face do talude, sendo que 4 cunhas são estáveis com Fator de Segurança superior a 1,5 e 13 tipos são cunhas instáveis com Fator de Segurança inferior a 1,0. Os pesos das cunhas instáveis variam de 26 kgf a 4490 kgf.

Tabela 2. Resultados das análises de estabilidade de cunhas (ADAPTADO DE GEOPHI ENGENHARIA, 2023).

Juntas	Formação de Cunhas	
	Peso (Tf)	Fator de Segurança
J1 - J6	0,073	0,00
J1 - J7	2,970	0,06
J1 - J8	2,990	0,42
J1 - J9	4,490	0,63
J1 - J10	0,160	8,66
J2 - J6	0,070	0,00
J2 - J7	2,750	0,41
J2 - J8	1,320	1,24
J2 - J9	0,550	4,40
J3 - J5	0,026	18,99
J4 - J6	0,046	2,67
J5 - J6	0,032	0,00
J6 - J7	0,080	0,00
J6 - J8	0,080	0,15
J6 - J9	0,080	0,11
J6 - J10	0,070	0,41
J8 - J9	1,410	0,61
J8 - J10	0,770	0,00

PROJETO DE ESTABILIZAÇÃO E PROTEÇÃO

As soluções propostas e dimensionadas nesta memória de cálculo em função dos modelos geomecânicos dos trechos são:

- Instalação de sistema de revestimento estabilizador com tela metálica de alta resistência e chumbadores sistemáticos em toda a extensão do trecho inicial (Área 1) e trecho final de crista do talude (Área 3);
- Instalação de sistema de revestimento simples com tela metálica de alta resistência e chumbadores no topo e na base do trecho final sob a crista do talude (Área 2). Este sistema funciona como uma “rede” para que, caso haja o desprendimento de blocos rochosos, eles fiquem retidos na base do talude, sem perigo para os usuários da via;



DOI: [10.29327/1430212.49-82](https://doi.org/10.29327/1430212.49-82)

ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ROCHOSO NA MG-120, KM 147,
POR MEIO DE TELA METÁLICA E CHUMBADORES SISTEMÁTICOS:
ESTUDO DE CASO

- Implantação de mureta de concreto nas cristas do talude para ordenamento das águas pluviais e proteção de deságue na pista.

A verificação da segurança foi realizada considerando as disposições regulamentares da NBR11682:2009, que recomenda fator de segurança mínimo aceitável para um talude calculado em função do impacto da ruptura nas vidas humanas e bens materiais/ambientais. Ressalte-se que a normativa não é específica para taludes rochosos com potencial de queda de blocos, porém pode ser interpretada e adaptada para este tipo de ocorrência. Foi considerada a importância da área e níveis de segurança associados à perda de vidas humanas e danos materiais/ambientais como alta e, desta forma, o fator de segurança mínimo adotado igual a 1,5.

Estabilização do Talude – Tela Metálica e Chumbadores Sistemáticos

As análises e dimensionamentos para estabilização e proteção do talude foram realizadas com o auxílio do programa MACRO 1 Studio Beta, desenvolvido pela Maccaferri (domínio público).

O MACRO 1 é baseado no princípio de equilíbrio limite e tem o objetivo calcular soluções que visam de aumentar a estabilidade superficial do maciço e impedir ou controlar os deslocamentos de detritos, lascas e blocos rochosos. O programa permite o dimensionamento dos espaçamentos de chumbadores em função da resistência e deformabilidade da tela, para que os fatores de segurança desejados sejam atendidos.

O software adota o critério de ruptura de juntas de Barton-Bandis (Barton & Bandis, 1990) e permite a caracterização específica das fraturas críticas por meio do ângulo de mergulho, coeficiente de rugosidade de junta e resistência à compressão da parede da junta.

O programa possibilita análises com cargas externas, estáticas e pseudo-dinâmicas e a seleção de fatores de segurança parciais para cargas e parâmetros físicos e de resistência do talude e chumbador. Em adição, determina o espaçamento e comprimento de chumbadores por meio da resistência ao arrancamento de chumbador (Bustamante & Doix, 1985; Clouterre, 1991). Maiores detalhes podem ser consultados em Maccaferri (2014) e Grimod & Giacchetti (2013).

A proposta de intervenção para estabilização e proteção do Talude consiste no dimensionamento do sistema de revestimento com tela metálica e chumbadores sistemáticos.

Dados de Entrada no Software MACRO 1

- Tela Metálica:

Tela especialmente desenvolvida para revestir taludes, por possuir alta resistência, evitando o desprendimento e queda de rochas, minimizando erosões e favorecendo a estabilização superficial do maciço. Ela deve apresentar resistência à tração longitudinal ≥ 177 kN/m e força de punção ≥ 149 kN, com deslocamento máximo igual a 420 mm em ensaio estabelecido pelas normas vigentes.

- Chumbadores:

O sistema de telas é ancorado por chumbadores compostos de barras de aço de diâmetro nominal igual a 32,0 mm e carga de trabalho igual a 200 kN. As barras devem ser tratadas contra a corrosão e rosqueadas para facilitar a fixação da porca de aperto da placa ao chumbador.

Os chumbadores são executados em furos com diâmetro mínimo de 75,0 mm, inclinados de 10° com a horizontal. A injeção dos chumbadores em rocha pode ser realizada com calda (nata) de cimento (fck igual ou superior a 25MPa) ou com resina, observando que nesta condição o diâmetro do furo



deve atender ao diâmetro do tubo de resina.

No caso da calda ou nata de cimento, recomenda-se o fator água/cimento de 0,5 e injeções ascendentes até vazamento da nata na boca do furo e realizadas em 2 etapas: bainha e reinjeção, a qual é realizada por meio de tubo com válvulas manchete a cada 50 cm, e após 3 horas de cura da nata de cimento da bainha.

- **Parâmetros do maciço rochoso:**

Os parâmetros de entrada para o dimensionamento do sistema de tela metálica com chumbadores abrangem as condições geométricas do talude aferidos pela topografia, incluindo a inclinação da face, verificadas com o auxílio de bússola em campo. A espessura instável do talude foi aferida por meio de análises de ruptura em cunha e planar, que identificam lascas e blocos instáveis, que foram obtidas através das análises realizadas pelos softwares DIPS e SWEDGE.

A junta adotada para análise corresponde à junta crítica com ângulo de mergulho determinado pelo mapeamento com bússola em campo e que corresponde à intersecção das juntas que formam as cunhas instáveis de maior volume, com direção de mergulho para a face do talude. Os parâmetros de resistência da parede da junta crítica foram avaliados em função das observações de campo (tipo litológico dominante, grau de alteração, rugosidade e presença de material de preenchimento).

Desta forma, os valores de resistência à compressão da parede da junta e coeficiente de rugosidade foram estimados considerando valores de literatura, calibrados com as medições de rebote com Martelo Schmidt. De forma análoga, o valor da resistência ao arrancamento ou tensão de adesão nata-rocha do chumbador foi estimado a partir de ensaios em material rochoso similar.

Os parâmetros adotados para o dimensionamento são apresentados na Tabela 3, destacando-se que a espessura de talude instável e inclinação da junta crítica foram determinadas a partir das análises de estabilidade de cunhas para o talude.

Tabela 3. Parâmetros geotécnicos adotados para o dimensionamento do sistema cortical, que foram adotados nas áreas 1 e 3 (ADAPTADO DE GEOPHI ENGENHARIA, 2023).

Parâmetro	Valor
Inclinação do talude	87°
Peso específico da rocha	27,0 kN/m ³
Espessura do talude instável	1,4 m ⁽¹⁾ e 3,0 m ⁽²⁾
Espessura de transição do talude	0,3 m
Inclinação da junta crítica	49° ⁽¹⁾ e 45° ⁽²⁾
Resistência à compressão da junta crítica JCS	30 MPa ⁽¹⁾ e 15 MPa ⁽²⁾
Coeficiente de rugosidade da junta crítica JRC	1
Tela metálica	
Resistência à tração mínima da tela metálica	177,0 kN/m
Deslocamento máximo admissível da tela metálica	0,42 m
Barra de aço do chumbador	
Diâmetro nominal da barra de aço	32 mm
Carga de trabalho da barra de aço	>=200 kN
Diâmetro nominal do cabo de ancoragem de topo	16,0 mm
Tensão de escoamento do cabo de aço	1770 MPa
Resistência ao arrancamento chumbador-rocha	0,40 MPa
Obs: ⁽¹⁾ Valores relativos à Área 1; ⁽²⁾ Valores relativos à Área 3.	



DOI: 10.29327/1430212.49-82

ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ROCHOSO NA MG-120, KM 147,
POR MEIO DE TELA METÁLICA E CHUMBADORES SISTEMÁTICOS:
ESTUDO DE CASO

Dimensionamento dos chumbadores

O comprimento de ancoragem do chumbador (L_a) é determinado conforme Bustamante & Doix (1985):

$$L_a = \frac{T \cdot k}{D \cdot \pi \cdot q_s} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

T : carga axial máxima mobilizada no chumbador;

D : diâmetro do furo do chumbador;

k : Fator de majoração da carga axial do chumbador;

q_s : resistência ao arrancamento do chumbador do contato nata/resina-rocha.

O comprimento total (L) mínimo do chumbador é expresso por:

$$L = L_a + L_{inst} + L_{trans} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde,

L_a : comprimento mínimo de ancoragem;

L_{inst} : espessura da camada instável;

L_{trans} : espessura da camada de transição.

Portanto, os comprimentos ancorados e comprimentos totais são calculados para:

- Trecho Inicial (Área 1) e Trecho final – Base (Área 2):

$$L_a = \frac{141,7}{0,075 \cdot \pi \cdot 400} = 1,50 \text{ m},$$

$$L = 1,5 + 1,4 + 0,3 = 3,2 \text{ m}, \text{ adotado } 3,50 \text{ m}$$

- Trecho Final – Crista (Área 3):

$$L_a = \frac{142,2}{0,075 \cdot \pi \cdot 400} = 1,50 \text{ m},$$

$$L = 1,5 + 3,0 + 0,3 = 4,8 \text{ m}, \text{ adotado } 5,00 \text{ m}$$

Desta forma, os revestimentos estabilizadores com tela metálica, dimensionados por meio do programa MACRO 1 e os comprimentos de chumbadores calculados conforme Bustamante & Doix (1985), apresentam os arranjos típicos conforme apresentado na Tabela 4 e Figuras 6 a 8:

Tabela 4. Configuração final da malha de ancoragem com chumbadores (ADAPTADO DE GEOPHI ENGENHARIA, 2023).

Parâmetros do sistema dos chumbadores	ÁREA 1	ÁREA 2	ÁREA 3
Espaçamento Horizontal (m)	2,5	2,5	1,5
Espaçamento Vertical (m)	2,0	-	1,5
Comprimento de ancoragem L_a (m)	1,5	1,5	1,5
Comprimento total do chumbador L_t (m)	3,5	3,5	5,0



Rosemberg Ferreira Nunes,
Flávia Lima Costa, Dionísio Tadeu de Azevedo,
Camila Hilário Bethônico & Roberto Navarro de Castro

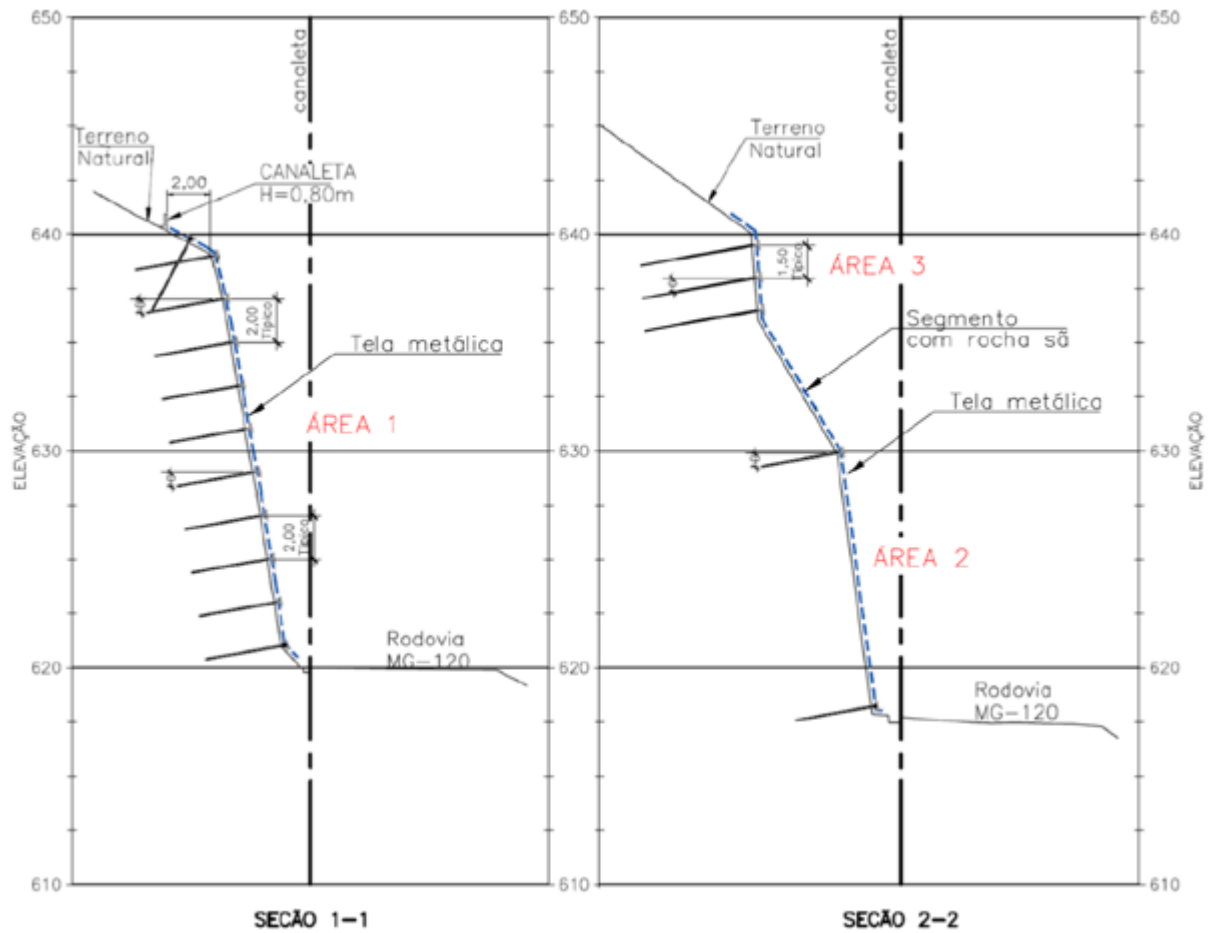


Figura 6. Seções transversais tipo do sistema de estabilização (ADAPTADO DE GEOPHI ENGENHARIA, 2023).

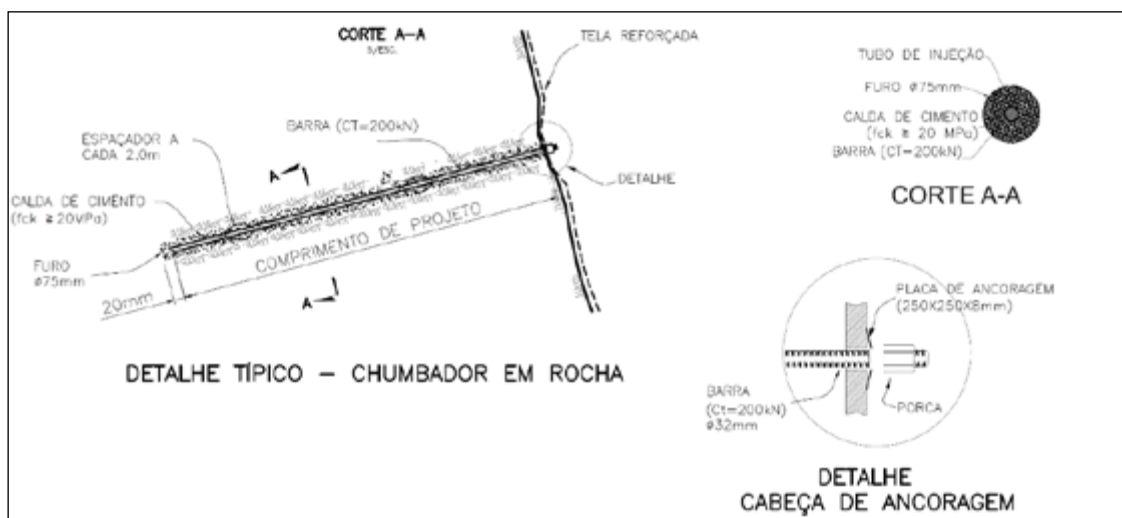


Figura 7. Detalhes e características da barra de ancoragem (ADAPTADO DE GEOPHI ENGENHARIA, 2023).



DOI: 10.29327/1430212.49-82

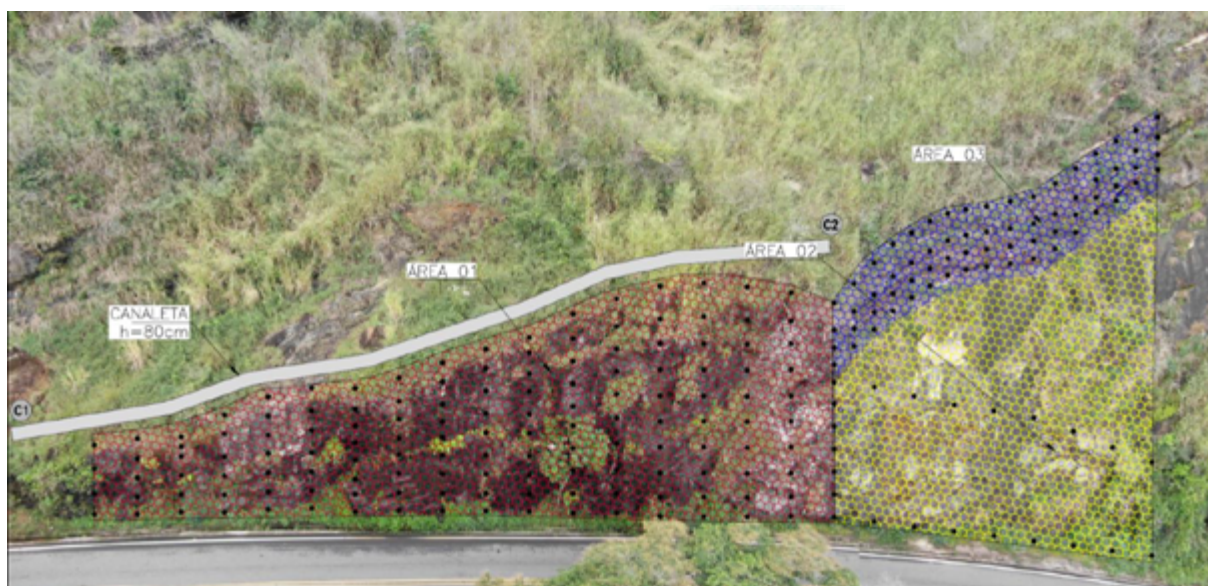
ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ROCHOSO NA MG-120, KM 147,
POR MEIO DE TELA METÁLICA E CHUMBADORES SISTEMÁTICOS:
ESTUDO DE CASO

Figura 8. Mosaico esquemático do sistema de estabilização do talude (GEOPHI ENGENHARIA, 2023).

Fatores de Segurança adquiridos e resumo do sistema de estabilização proposto

A estabilização com tela metálica e chumbadores sistemáticos garantiu Fatores de Segurança satisfatórios para o sistema de ancoragem conforme Tabela 5, indicando elevada otimização do sistema tela-chumbadores e atendendo às recomendações da normativa brasileira de estabilidade de taludes e normativas italiana e europeias para sistemas estabilizadores com telas metálicas.

Tabela 5. Sistema de chumbadores e Fatores de Segurança (ADAPTADO DE GEOPHI ENGENHARIA, 2023).

Fatores de segurança do sistema de malha metálica e chumbadores	ÁREA 1	ÁREA 3
Fator de Segurança do sistema de ancoragens	1,59	1,63
Fator de Segurança da tela ELU	6,89	12,12
Fator de Segurança da tela ELS	1,09	1,15

Obs.: ELU: Estado Limite Último; ELS: Estado Limite de Serviço.

Nota: A ÁREA 2, por possuir grau de alteração menor em relação as demais áreas, recebeu um revestimento simples, o qual não tem impacto direto no fator de segurança do sistema, mas evita que os eventuais blocos atinjam a pista.

A Tabela 6 resume as intervenções geotécnicas para estabilização e proteção dos trechos do Talude em estudo:

Tabela 6. Parâmetros dos sistemas de estabilização do Talude (ADAPTADO DE GEOPHI ENGENHARIA, 2023).

Parâmetro	Tela metálica de alta resistência e chumbadores sistemáticos		
	Valor, Tipo e Quantidade		
	ÁREA 1	ÁREA 2	ÁREA 3
Tela metálica			
Resistência à tração mínima	177 kN/m		
Resistencia mínima ao puncionamento	149 kN		



Rosemberg Ferreira Nunes,
Flávia Lima Costa, Dionísio Tadeu de Azevedo,
Camila Hilário Bethonico & Roberto Navarro de Castro

Placa de ancoragem	250 X 250 X 8mm		
Barra de aço (chumbador)			
Diâmetro nominal da barra de aço	32 mm		
Carga de trabalho nominal da barra	≥ 200 kN		
Diâmetro mínimo do furo	75 mm		
Inclinação do chumbador com a horizontal	10°		
Espaçamento horizontal entre chumbadores	2,5 m	2,5 m	1,5 m
Espaçamento vertical entre chumbadores	2,0 m	-	1,5 m
Comprimento mínimo do chumbador (1)	3,5 m	3,5 m	5,0 m

CONCLUSÕES

As intervenções propostas visam alcançar múltiplos objetivos. Primeiramente, buscam reduzir a perda de qualidade geomecânica dos maciços causada pelo intemperismo. Além disso, pretendem estabilizar áreas com potencial elevado de ruptura. No entanto, o principal propósito é garantir a operação contínua e segura da rodovia, evitando intervenções invasivas que poderiam interditar a pista durante sua execução, como o rompimento do talude com explosivos.

A estabilização utilizando sistema de tela metálica de alta resistência e chumbadores sistemáticos demonstrou resultados satisfatórios em termos de segurança. Os fatores de segurança para o sistema de ancoragem e para a tela metálica atingiram valores adequados tanto no estado limite último quanto no estado limite de serviço.

Por fim, recomenda-se fortemente a realização de ensaios de arrancamento de chumbadores específicos para determinar a resistência ao arrancamento e confirmar os valores adotados nos estudos. Esta prática é crucial para otimizar o projeto apresentado na memória de cálculo, garantindo sua eficácia e segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2009) NBR 11682:2009. Estabilidade de encostas.

ABNT (2018) NBR 5629:2018. Execução de Tirantes Ancorados no Terreno.

ABNT (2021) NBR 16920-2:2021. Muros e taludes em solos reforçados, Parte 2: Solos grampeados.

Azevedo, D.T. (2022) Análise geológica de cortes rochosos na MG -383, próximos ao km 120, Trecho: Soledade de Minas – Entr. BR460 (São Lourenço), Relatório Técnico DP/GEM/Geologia e Sondagem, 7p.

Barton, N.; Bandis, S. (1990) Review of Predictive Capabilities of JRC-JSC Model in Engineering Practice. In Rock joints, Proc. Int. Symp. Rock Joints, Loen, Norway, (eds N. Barton; O. Stephansson), Rotterdam: Balkema, pp.603- 610.

Bieniaswki, Z.T. (1989) Engineering Rock Mass Classifications – A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering, John Wiley & Sons.

Bustamante, M.; Doix, B. (1985) Une méthode pour le calcul des tyrants et des micropieux injectées. Bulletin des Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées, no 140.

GEOPHI Engenharia, GEO Ø (2023). Projeto Executivo de Estabilização de Taludes Rochosos do Km 147 MG-120 – Capelinha. Memória de Cálculo GPHI-PJ163-MC-415-03-002-R0. Junho de 2023

Grimod A.; Giacchetti G. (2013) New Design Software for Rockfall Simple Drapery Systems. Proc. 23rd World Mining Congress & Expo, Montreal, Paper No.255.

Maccaferri (2014) MACRO 1 Theory and Background. Version 1.08, 33 p.



ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM MACIÇO ROCHOSO EM TRECHOS DAS RODOVIAS PE-160 E BR-104 COM ÊNFASE DA SEGURANÇA VIÁRIA

Shirley Minnell Ferreira de Oliveira¹; Tallys Celso Mineiro²

RESUMO

Estudos de segurança viária são fundamentais para intervenção em rodovias que apresentam níveis elevados de ocorrências de sinistros de trânsito. E nesse sentido, foi verificado vários acidentes ocorridos nos trechos das rodovias PE-160 e BR-104/PE, provocados pelas instabilidades dos taludes na região em questão. É comum em obras rodoviárias o corte de maciços rochosos resultando em encostas, que necessitam de estabilidade para o pleno funcionamento das suas vias geratrizes. Com o intuito de minimizar os níveis de sinistros de trânsito decorrentes das instabilidades dos taludes, este estudo pretende analisar encostas provenientes da duplicação do trecho da PE-160 e BR-104/PE entre os municípios de Santa Cruz do Capibaribe e Toritama, com o objetivo de verificar a estabilidade das mesmas utilizando classificações geomecânicas como ferramentas de quantificação e qualificação. Foi realizado um levantamento dos locais que mais vem sofrendo sinistros de trânsito no trecho devido aos problemas decorrentes das encostas. Posteriormente foi realizada a verificação da estabilidade dos taludes utilizando o RMR (Rock Mass Rating) e SMR (Slope Mass Rating). Com os dados obtidos em campo, calculou-se o RMR dos maciços e este valor foi utilizado para a determinação do SMR que qualifica a condição de estabilidade global do talude. Os resultados obtidos identificaram situações de estabilidade global nos taludes contudo, observou-se instabilizações localizadas, e para tais condições mínimas, metodologias de melhoramento e proteção foram sugeridas. Logo, a utilização de estudos de estabilidade de taludes como este, podem auxiliar na verificação das condições de segurança viária da rodovia assegurando-as ou antevendo incidentes e sinistros de trânsito e, ajudando em tomadas de decisões.

PALAVRAS-CHAVE: Segurança viária; geomecânicas; estabilidade de taludes; SMR; RMR.

ABSTRACT

Road safety studies are essential for intervention on highways that have high levels of accidents. In this sense, several accidents occurred on the stretches of the PE-160 and BR-104/PE highways, caused by the occurrence of slope instability on this stretch. It is common in road works to cut rock masses resulting in slopes, which require stability for the full functioning of their generating lines. In order to minimize the levels of accidents resulting from slope instabilities, this study intends to analyze slopes resulting from the duplication of the stretch of PE-160 and BR-104/PE between the municipalities of Santa Cruz do Capibaribe and Toritama, with the objective of verify their stability using geomechanical classifications as quantification and qualification tools. A survey was carried out of the places that have suffered the most accidents on the stretch due to problems arising from the slopes. Subsequently, the stability of the slopes was checked using RMR (Rock Mass Rating) and SMR (Slope Mass Rating). With the data obtained in the field, the RMR of the masses was calculated and this value was used to determine the SMR that qualifies the global stability condition of the slope. The results obtained identified situations of global stability in the slopes; however, localized instability was observed, and for such minimal conditions, improvement and protection methodologies were suggested. Therefore, the use of slope stability studies like this one can help verify the road safety conditions of the highway, ensuring them or anticipating incidents and accidents, and helping with decision-making.

KEY WORDS: Road safety; geomechanics; slope stabilit; SMR; RMR.

¹ UFPE, e-mail: shirley.minnell@ufpe.br

² UFPE, e-mail: tallys.mineiro@ufpe.br



INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário, no Brasil, é o principal modo de transporte de cargas. Uma rodovia é capaz de alterar os padrões socioeconômicos de determinadas regiões, seja por meio de produtos de importação ou exportação. Devido a isso, as grandes empresas normalmente tendem a se instalar em laterais de rodovias, em função da facilidade de emissão ou recebimento de mercadorias de outros locais (PEREIRA et al., 2015).

Neste cenário, o trecho da BR-104 objeto deste estudo está completamente inserido no Estado de Pernambuco, e se inicia no entroncamento da PE-160 (Pão de Açúcar) no município de Taquaritinga do Norte e finaliza no entroncamento da PE-149 (Agrestina) no município de Caruaru.

Dados coletados no posto da Polícia Rodoviária Federal localizado no trecho de estudo no período entre janeiro de 20013 e abril de 20018, mostram que nos 51,4 km abrangidos neste estudo (km 19,8 - 71,2), 77 pessoas perderam a vida e 860 ficaram feridas em 1.072 registros de acidentes de diversas tipologias ocorridos.

Conforme dados da Polícia Rodoviária Federal, os fatores que mais influem os índices de sinistros de trânsito nas rodovias do Brasil são: a falta de conservação das estradas (incluindo os taludes), o sono e a imprudência dos condutores nas ultrapassagens em lugares proibidos. Estes são os maiores responsáveis pelo alto nível de sinistros de trânsito nas estradas. No caso da BR-104, os tipos de acidentes mais frequentes estão relacionados com atropelamentos de pedestres, colisões, instabilidades dos taludes e atropelamentos de animais causados pelo precário estado de manutenção da cerca que delimita a faixa de domínio, que em alguns trechos, chega a ser inexistente. Ainda são frequentes os casos de saída da pista, capotagem e outros.

No cenário das possíveis causas dos sinistros de trânsito no trecho da rodovia PE-160 e BR-104/PE, foi realizado um foco na falta da conservação da rodovia quanto a estabilidade dos taludes.

Estas condições de instabilidade intrínsecas são concebidas devido as características morfológicas e geológicas do maciço, assim como, as conformações fisiográficas onde este se encontra. Na existência de interação exterior, a qual pode-se alterar alguns condicionantes estabilizadores e, conseqüentemente, incidir na ocorrência da alteração do meio físico original é fatídica a aceleração dos processos de desestabilização dos taludes.

Consoante Goodman (1989), instabilizações em taludes rochosos podem acarretar em risco de rupturas e deslizamentos de blocos de rochas, estes fenômenos podem ocorrer de diferentes maneiras, e bastante complexas quando existem múltiplas famílias de descontinuidades em um mesmo maciço. Contudo, estas instabilizações podem ser analisadas de acordo com três tipos de rupturas, sendo elas planas, em cunha e por tombamento.

Essas possibilidades de ruptura quando analisadas cinematicamente ou por meio de classificações geomecânicas podem ter suas estabilidades avaliadas, e pode-se antever padrões de rompimento de taludes a fim de se mitigar os danos materiais causados.

Logo, a avaliação da estabilidade de certas conformações de taludes rochosos, como os encontrados em obras rodoviárias, podem ser executadas por meio de metodologias empíricas como as classificações geomecânicas RMR – Rock Mass Rating e SMR – Slope Mass Rating.

O RMR é um sistema de classificação que leva em consideração fatores geotécnicos físicos do maciço rochoso como a qualidade da rocha constituinte (RQD) e algumas características das



DOI: [10.29327/1430212.49-88](https://doi.org/10.29327/1430212.49-88)

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM MACIÇO ROCHOSO EM TRECHOS DAS RODOVIAS PE-160 E BR-104 COM ÊNFASE DA SEGURANÇA VIÁRIA

descontinuidades ocorrentes (BIENIAWSKI, 1989). Enquanto, o SMR configura-se como uma adaptação do RMR, mas que engloba fatores que efetuam uma análise cinemática do talude no maciço rochoso (ROMANA, 1993).

Assim sendo, em obras rodoviárias, por serem de extrema importância social, as quais ocorram a presença de taludes rochosos é necessário se estudar e compreender a susceptibilidade de movimentações de blocos de rochas ou rupturas de encostas sobre a pista, a fim de se evitar eventuais interdições para manutenção destas ocorrências ou até mesmo danos aos usuários de tais rodovias. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar as condições de estabilidade de taludes rochosos ao longo de um trecho de duplicação da PE-160 e BR-104 por métodos geomecânicos entre os municípios de Santa Cruz do Capibaribe e Toritama visando a segurança viária da rodovia.

Para alcançar o objetivo proposto foi realizado os pontos críticos de instabilização dos taludes que inviabilizam a segurança viária, Determinação da classificação geomecânica RMR a partir de propriedades físicas e mecânicas do maciço rochoso (resistência da rocha intacta, RQD) e suas descontinuidades (influência da água, persistência, rugosidade, espaçamento, abertura, preenchimento e alteração), aplicação da metodologia de classificação geomecânica SMR para verificar a estabilidade dos taludes de maciço rochoso com probabilidade de ruptura planar e por fim, determinar os possíveis tipos de escorregamentos nos taludes dos maciços rochoso.

METODOLOGIA

A área de estudo escolhida para o presente trabalho situa-se no trecho do entroncamento da PE-160 e BR-104, no município de Santa Cruz do Capibaribe/PE. A escolha baseou-se, principalmente, pela importância do trecho que dá acesso ao polo comercial de confecções da região que proporciona um fluxo considerável de veículos durante seu funcionamento e contribui para o escoamento das mercadorias têxteis do estado; bem como pela origem e conformação das encostas que, em sua maioria, são originárias devido ao processo de duplicação do trecho em estudo.

A Figura 1 mostra o trecho estudado, que compreende aproximadamente 16,2 km, e a localização dos 3 taludes analisados.

O posicionamento, em coordenadas, dos taludes ao longo do trecho encontra-se na Tabela 1, enfatizando que a coleta destes dados foi feita mediante uso da aplicação Bússola do iPhone.

Geologicamente, consoante o Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2017), a região de estudo situa-se na porção centro-leste da Província Borborema, a qual é compreendida essencialmente por litotipos pré-cambrianos e pequenos percentuais de rochas cenozóicas.



Tabela 1. Coordenadas de latitude e longitude dos taludes analisados. (MINEIRO, 2021)

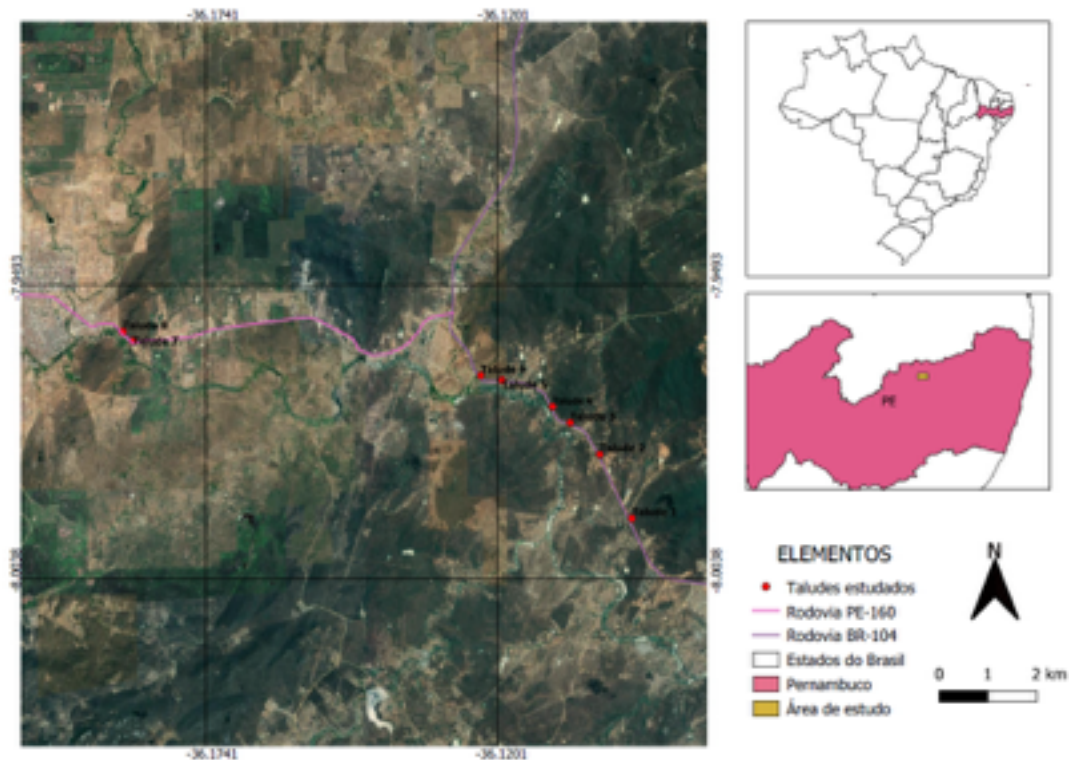


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo. (MINEIRO, 2021)

A geologia foi caracterizada principalmente por ortognaisses migmatíticos e sequências supracrustais agrupadas em diferentes complexos e numerosos plútons neoproterozóicos. Além disso, no subdomínio Rio Capibaribe a maioria dos afloramentos foi evidenciada por ortognaisses de composição granítica e com metanortositos, caracterizando, portanto, a qualidade e competência dos maciços rochosos da localidade (CPRM, 2017).

Com relação ao levantamento geológico e geotécnico a obtenção das altitudes dos taludes e descontinuidades foi utilizado uma bússola digital, os demais parâmetros relativos as condições geológico-geotécnicas das descontinuidades foram obtidos com o uso de uma fita métrica e uma régua graduada. É importante salientar que certas especificações se obtém a partir de reconhecimento tátil e visual. As descrições obtidas seguiram as normativas da International Society of Rock Mechanics - ISRM (1981) e foram averiguadas consoante as metodologias e terminologias padronizadas por Bieniawski (1989) e Romana (2003).

Logo, buscou-se verificar as seguintes condições determinísticas para o processamento do índice RMR, que estão descritos na Tabela 2 com suas respectivas faixas de pesos. Estes pesos são somados gerando, por conseguinte, o RMR. No que concerne a resistência da rocha intacta, a mesma pode ser determinada por meio do uso de um esclerômetro de Schmidt ou por meio do uso de um martelo petrográfico, que foi a metodologia adotada no presente trabalho. As normativas da ISRM (1978) esclarecem como determinar uma faixa de resistência para cada amostra.



DOI: 10.29327/1430212.49-88

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM MACIÇO ROCHOSO EM
TRECHOS DAS RODOVIAS PE-160 E BR-104 COM ÊNFASE DA SEGURANÇA VIÁRIA

Tabela 2 . Parâmetros necessários para o cálculo do RMR. (Adaptado BIENIAWSKI, 1989)

PARÂMETRO	FAIXA DE PESO
Resistência da rocha intacta (UCS)	0-15
RQD (Rock Quality Designation)	0-20
Espaçamento das descontinuidades	0-20
Padrão das descontinuidades	0-30
Ação da água nas descontinuidades	0-15

Enquanto que para a obtenção do RQD, segundo parâmetro requerido para o RMR e normalmente obtido em ensaio específico de sondagem em rocha, neste caso foi obtido através de correlação. Palmstrom (2005) propôs uma correlação entre o RQD e a densidade volumétrica de descontinuidades por metro cúbico ou densidade volumétrica de juntas (J_v), indicada na Equação 1.

$$\text{RQD (\%)} = 115 - 3,3(J_v) \quad (1)$$

Tal correlação assume valor nulo quando a densidade de juntas é maior que 35 e assume valor total para casos em que a densidade seja menor que 4,5.

A densidade volumétrica de juntas, todavia, concerne na quantidade de juntas que interceptam um metro cúbico e é regida pela soma das frações de quantidade de juntas de uma determinada família de descontinuidades pelo seu comprimento de análise (Palmstrom, 2005). A Equação (2) mostra o processo de cálculo da densidade volumétrica de juntas (J_v).

$$J_v = 1/S_1 + 1/S_2 + \dots + 1/S_n \quad (2)$$

Sendo S_1 , S_2 e S_n a média dos espaçamento das juntas.

Deere (1967) designou uma classificação de acordo com a desempenho dos maciços rochosos a partir do RQD.

Outro parâmetro analisado é o espaçamento entre as descontinuidades que se agrupam em uma determinada família, tal valor associa-se as dimensões dos blocos formadores do maciço, e foi devidamente averiguado consoante a ISRM (1981).

A persistência corresponde a extensão mensurada de uma descontinuidade em um plano, e caracteriza-se como sendo de grande importância, pois normalmente condiciona o plano de ruptura da encosta rochosa. A ISRM (1981) determinou padrões de classificação para a persistência.

A abertura consiste na distância entre as faces das superfícies limitrófes da junta e pode variar durante sua persistência. Novamente, a ISMR determinou as terminologias de classificação para tal requisito.

A rugosidade é uma propriedade, inerente as juntas, que determina o padrão de irregularização das suas superfícies e sua importância consiste em afetar diretamente na resistência ao deslizamento das juntas. Neste trabalho, a metodologia adotada para a classificação da rugosidade foi a utilização da



determinação visual por scanline proposta por Barton et al. (1977) através do Joint Roughness Coefficient (JRC), índice tal que determina desde superfície lisa até uma superfície muito rugosa. O preenchimento concerne no material que integra o espaço entre as paredes adjacentes das descontinuidades. Normalmente originário do intemperismo físico que a rocha foi submetida ou transportado pela água, bem como pode ser inexistente dependendo da mineralogia do maciço. Este conceito com suas propriedades inerentes controla o comportamento da descontinuidade. Neste estudo será utilizada a terminologia descrita na Tabela 3 e proposta por Bieniawski (1989).

Tabela 3. Classificação do preenchimento de descontinuidades. (Adaptado BIENIAWSKI, 1989)

DESCRIÇÃO DO PREENCHIMENTO
Nenhum
Resistente com espessura < 5mm
Resistente com espessura > 5mm
Mole com espessura < 5mm
Mole com espessura > 5mm

A última caracterização proposta para definir o padrão da descontinuidade é o grau de alteração da rocha que corresponde as condições de decomposição, desagregação e intemperização da mesma. Existem dois tipos de alteração: desintegração mecânica e decomposição química. Na maioria dos casos, as duas resultantes agem concomitantemente; no entanto, dependendo do regime climático uma delas pode ser dominante. A alteração mecânica resulta na abertura de descontinuidades, na formação de novas juntas pelo fraturamento da rocha e a abertura ou clivagem de regiões mineralizadas. Enquanto a decomposição química resulta na descoloração da rocha e conduz a decomposição de silicatos em materiais argilosos (ISRM, 1978). A terminologia da classificação foi determinada pela ISRM.

Por fim, o parâmetro final analisado é relativo a ação da água na estruturação da descontinuidade. De crucial relevância para a determinação do RMR, pois a mesma é um fator instabilizante e que corresponde a mais simples das caracterizações, uma vez que sua especificação se dar de forma tátil e visual. A classificação adotada é descrita por Bieniawski, (1989).

O processamento dos dados para o cálculo do RMR e SMR foram obtidos através da associação de cada parâmetro classificado com seu respectivo peso na sistemática estipulada por Bieniawski (1989) para calcular o RMR.

Bieniawski (1973) qualificou os referidos índices de RMR de acordo com a capacidade autoportante do maciço rochoso. Para a determinação do índice SMR, proposto por Romana (1985) como uma contribuição os sistema de classificação de Bieniawski (1989), utiliza-se como base o valor do RMR adicionado de uma multiplicação de fatores que se definem intrinsicamente a conformidade geométrica de estruturação do talude e suas descontinuidades, bem como a adição de um fator relativo a metodologia de corte do maciço.



DOI: 10.29327/1430212.49-88

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM MACIÇO ROCHOSO EM
TRECHOS DAS RODOVIAS PE-160 E BR-104 COM ÊNFASE DA SEGURANÇA VIÁRIA

Após calculados os índices RMR e SMR, os taludes e seus respectivos maciços rochosos foram classificados de acordo com sua estabilidade, bem como analisadas as prováveis e eventuais rupturas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mediante visita de campo, para cada talude, foram coletados direção e inclinação, direções geológicas e mergulho das respectivas famílias de descontinuidades, e adicionalmente a quantidade de juntas por metro que estavam presente em pontos mais críticos para o cálculo da densidade das mesmas.

A densidade foi obtida pela soma das descontinuidades, uma vez que o volume analisado para o conjunto de famílias foi de 1 m³ e, por conseguinte, obteve-se por correlação o RQD. Os referidos dados podem ser vistos na Tabela 4.

Tendo em vista a heterogeneidade dos maciços e as práticas de corte, os taludes de certa forma não tem uma inclinação definida para sua extensão total, bem como para uma mesma seção pode-se haver irregularidades. Desse modo, a inclinação adotada foi tal que configurasse pela estatística de medida central das inclinações presentes de forma aproximada. Os mergulhos negativos caracterizam descontinuidades que adentram o talude, possibilitando, então, uma ruptura por tombamento.

Em geral, os taludes pela conferência de resistência da rocha intacta ou Ensaio de Compressão Simples (UCS) se mostraram competentes ao ponto de serem necessários vários golpes para a fratura pela metodologia de campo, isto geologicamente, se deve ao fato de tais maciços serem provenientes em sua maioria de ações ígneas, uma vez que os mesmos são compostos por granitóides.

No que concerne as descontinuidades, de forma genérica, possuem persistência consideráveis com aberturas que podem variar de 1 mm à maiores que 5 mm sem presença considerável de preenchimento e sob condições secas, variando com significância suas alterações e rugosidades.

Tabela 4. Caracterização dos taludes e suas respectivas famílias. (MINEIRO, 2021)

TALUDE	DIREÇÃO	INCLINAÇÃO	FAMÍLIA	DIREÇÃO GEOLÓGICA	MERGULHO	NJUNTAS/m	Jv	RQD
1	348° N	75°	F1	156° SE	26°	5	8	91
			F2	148° SE	90°	1		
			F3	59° NE	81°	2		
2	312° NO	70°	F4	58° NE	32°	3	9	88
			F5	85° L	-49°	3		
			F6	320° NO	85°	3		
			F8	28° NE	90°	4		
3	342° NE	70°	F7	125° SE	-22°	9	13	76
			F8	28° NE	90°	4		



Os taludes em sua maioria são semelhantes tendo alturas por volta dos 5 metros e extensões de 100 à 200 metros, sendo somente o talude 3 distinto com altura de aproximadamente 20 metros. Pode-se observar nas Figuras de 2 à 4 os taludes ou regiões deles, respectivamente.

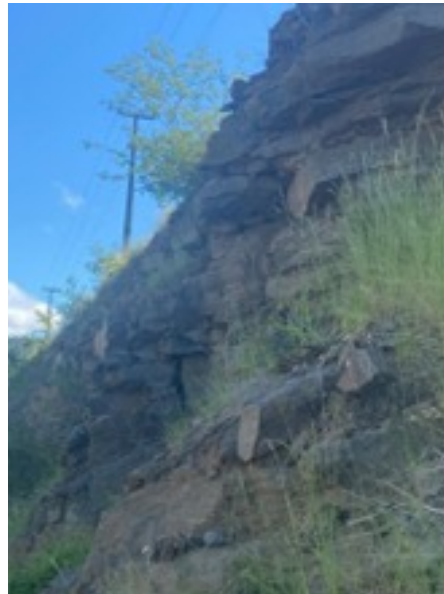


Figura 2. Talude 1. (MINEIRO, 2021)



Figura 3. Talude 2. (MINEIRO, 2021)



DOI: 10.29327/1430212.49-88

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM MACIÇO ROCHOSO EM
TRECHOS DAS RODOVIAS PE-160 E BR-104 COM ÊNFASE DA SEGURANÇA VIÁRIA

Figura 4. Talude 3. (MINEIRO, 2021)

Os índices de classificação RMR, foram compilados de acordo com Bieniawski (1973), a partir dos dados coletados em campo, e posteriormente serão base para a determinação do SMR. Este valor corresponde a competência do maciço rochoso e tem amplitude de valores que vai de 0 à 100. A Tabela 5 expõe as condições em que se encontram as descontinuidades e o maciço rochoso de acordo com seus respectivos pesos.

Tabela 5. Determinação dos índices RMR por família de descontinuidade. (MINEIRO, 2021).

TALUDE	FA MÍ LI A	UCS	RQD	ESPAÇA MENTO	PERSIST ÊNCIA	ABERT URA	RUGOSI DADE	PREENCHI MENTO	AL Á TE G RA U ÇÃ O	RMR
1	F1	15	20	8	2	0	5	6	3 1 5	74
	F2	15	20	15	2	0	5	6	3 1 5	81
	F3	15	20	10	2	0	5	6	3 1 5	76
2	F4	15	17	10	2	1	5	6	3 1 5	74
	F5	15	17	10	2	0	5	6	3 1 5	73
	F6	15	17	10	2	0	1	6	3 1 5	69
3	F7	15	13	5	2	1	1	6	1 1 5	59
	F8	15	13	8	2	0	1	6	1 1 5	61



Em geral, para cada talude, sugere-se o estabelecimento do menor índice encontrado dentre as famílias analisadas a fim de se estar a favor da segurança. Os resultados evidenciam uma boa qualificação e competência dos taludes, com maciços rochosos variando de bom a muito bom, excetuando-se o talude 3 que tem maciço classificado como regular (Classe III).

Para o cálculo do SMR optou-se somente analisar as famílias de descontinuidades que tinham mais chances de acontecer uma ruptura planar e para isto foram utilizados os índices RMR das respectivas famílias. Conseqüentemente, foram analisadas as famílias 1 (Talude 1) e 4 (Talude 2); devido aos mergulhos relativos a inclinação dos seus respectivos taludes. Encontrou-se os seguintes resultados para a obtenção do índice SMR, que são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Valores empíricos do fator F4. (MINEIRO, 2021)

TALUDE ESTUDADO	F1	F2	F3	F4	RMR	SMR
Talude 1	0,15	0,237 8	-29,71	0	74	73
Talude 2	0,15	0,390	-29,57	0	74	72
		4				

Assim sendo, com os respectivos valores de SMR para cada talude, pode-se determinar a classe do maciço de acordo com as conformidades geométricas em que ele se encontra, a Tabela 7 mostra a qualificação proposta por Romana (2003). Romana ainda determinou a qualidade da estabilidade do maciço, assim como os prováveis tipos de ruptura das encostas.

Tomando como base os valores de SMR encontrados, é fatídico que as famílias analisadas em geral encontram-se estáveis, pois ficaram categorizadas na classe II. Contudo, como previsto por Romana (2003), mínimas rupturas ainda podem ser observadas considerando a metodologia de corte e também o estado em que os taludes se encontram.

Esta seção destina-se aos comentários das eventuais rupturas que possam vir acontecer com o passar do tempo, o desgaste estrutural do talude e suas possíveis metodologias de melhoramento. Embora os taludes estejam agrupados em classes estáveis, as conformações de suas descontinuidades podem promover instabilidades mínimas e locais em certas partes do talude. Isto provém do fato de o RMR classificar o maciço de forma global sem levar em conta suas conformizações geométricas localmente.

A seguir destacam-se as prováveis rupturas, para cada família de descontinuidade, de acordo com sua classificação na Tabela 7, tais rupturas são antevistas de acordo com a direção e mergulho de cada junta observados em campo.



DOI: 10.29327/1430212.49-88

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM MACIÇO ROCHOSO EM
TRECHOS DAS RODOVIAS PE-160 E BR-104 COM ÊNFASE DA SEGURANÇA VIÁRIA

Tabela 7. Tipo de provável ruptura observada em campo para cada família/ (MINEIRO,2021).

TALUDE	FAMÍLIA	TIPO DE RUPTURA
1	F1	Ruptura planar
	F2	Ruptura por tombamento
	F3	Ruptura planar/Ruptura em cunha
2	F4	Ruptura planar
	F5	Ruptura por tombamento
	F6	Ruptura em cunha
3	F7	Ruptura por tombamento
	F8	Ruptura por tombamento

Assim sendo, alguns taludes merecem ser destacados devido a algumas irregularidades ou peculiares configurações. O mais crítico deles, o talude 3, devido ao seu mediano RMR e sua alta densidade de juntas apresentará ocorrências frequentes de rupturas por tombamento. Contudo, seu correto distanciamento à valeta da rodovia induz suas instabilidades a serem depositadas no pé do talude sendo, portanto, uma boa prática de engenharia.

Em resumo, constatada a estabilização dos referidos taludes e suas zonas e características de falha é possível deliberar metodologias de correção para as prováveis instabilizações dos mesmos. Romana (2003) propõe que para os taludes com SMR entre 25 e 65 aproximadamente existe a possibilidade da utilização de concreto projetado para a estabilização das pequenas quedas e para os taludes com índices variando de 45 à 75 aproximadamente possam ser aplicadas, alternativamente, telas de contenção metálicas.

No presente caso, as proposições de melhoramento concernem na retirada dos blocos grandes em contrapartida ao atirantamento e a limpeza dos blocos de menor porte nos casos em que sejam viáveis. Para o talude 4, sugere-se o rearranjo da base do mesmo e a verificação da estabilidade nas zonas onde os fenômenos de desgaste ocorrem após a sua reconformação.

CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho é utilizar os conceitos e metodologias de Mecânica das Rochas na intenção de caracterizar geológico-geotecnicamente os taludes rochosos originados pelo processo da duplicação de trechos da rodovia PE-160 e BR-104, tal caracterização utilizou a metodologia dos índices Rock Mass Rating (RMR) e Slope Mass Rating (SMR) a fim de verificar a estabilidade dos taludes.

Analisou-se 3 taludes, os quais demonstraram condições estáveis com índices RMR de ótimos à regulares e tendências de rupturas planares globais controladas, evidenciando somente prováveis danos mínimos que são em sua maioria contidas pelas valas de drenagem ou espaçamento entre o talude e a rodovia, não causando danos consideráveis.



Por motivo de segurança, é sugerido somente a limpeza e retirada de blocos dos taludes como tática de melhoramento das condições dos taludes, uma vez que os índices definem taludes competentes. Expressar a qualidade de um maciço rochosos em um único índice sempre tem suas dificuldades, pois de certa forma é impraticável a contagem e catalogação de todas as descontinuidades presentes no maciço, que são diversas. Neste trabalho, analisou-se somente as descontinuidades que favoreciam condições de instabilidade, por observação em campo. Contudo, há descontinuidades que quando analisadas em interação com outras podem promover certas situações de desestabilidade.

Por fim, trabalhos de análise de estabilidade de taludes como este, são fundamentais para verificar as condições estruturais de taludes, e as práticas executivas em obras lineares para cortes em maciços. Portanto, certificando a segurança de estruturas como estas ou antevendo ocorrências danosas e minimizando os riscos à sociedade.

Além de, academicamente, contribuir para a difusão dos conhecimentos de Mecânica das Rochas EDA segurança viária, pouco conhecidos por estudantes de engenharia, bem como, socialmente, apresentando seguridade, melhoramentos alternativos para obras civis como esta e ajudando em futuras tomadas de decisões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARTON, N., CHOUBEY, V. **The shear strength of rock joints in theory and practice**. Rock Mechanics. Vienna: Springer. P 1-54. 1977.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering classification of jointed rock masses**. Transactions of South Africa Institute of Civil Engineers. v. 15, p. 355-344. 1973.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classifications**. New York, John Wiley. 251p. 1989.
- CPRM. **Geologia e recursos minerais da folha Santa Cruz do Capibaribe – SB.24-Z-D-VI**. Recife. 2017.
- DEERE, D. U.; HENDRON, A. J.; PATTON, F. D.; CORDING, E. J. **Design of surface and near-surface construction in rock**. Symposium on Rock Mechanics – American Institute Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. Mineapolis. p. 237-302. 1967.
- GOODMAN, R. E. **Introduction to rock mechanics**. 2nd ed. Willey. New York. 562p. 1989.
- ISRM (INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS). **Basic geotechnical description of rock masses**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & geomechanics Abstracts. v. 18: p. 85-110. 1981
- ISRM (INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS). **Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & geomechanics Abstracts. v. 15: p. 319-368. 1981.
- MINEIRO, T. C. Classificação geomecânica e análise da estabilidade de taludes em maciço rochoso em trechos das rodovias PE-160 e BR-104. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Pernambuco. 2021.
- PALMSTROM, A. **Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)**. Tunneling and Underground Space Technology. v. 20: p. 362-377. 2005.
- PEREIRA, Flávia Oliveira et al. Logística de transporte: Um estudo de caso dos desafios do transporte rodoviário para as operações de comércio exterior no Sul de Minas Gerais. 12º Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2015, Varginha - MG. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/9122283.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2024.
- ROMANA, M. **A geomechanics classification for slopes: slope mass rating**. Comprehensive Rock Engineering. London: Pergamon. p. 575-600. 1993.
- ROMANA, M. **New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes**. International Symposium on the Role of Rock Mechanics – ISRM. Zacatecas. p. 49-53. 1985.
- ROMANA, M.; SERÓN, J. B.; MONTALAR, E. **SMR geomechanics classification: application, experience and validation**. Journal Nielen van der Merwe. 10th Congress of the International Society for Rock Mechanics. Saldton. p. 8-12. 2003.



ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA TIPO SMA COM ÊNFASE NO PARÂMETRO PNEU-PAVIMENTO - ESTUDO DE CASO NA AVENIDA DO CONTORNO EM BELO HORIZONTE/MG BRASIL

Bernardo de Brito Pereira¹; Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli¹; Marcelo Franco Porto²; Ronderson Queiroz Hilário³

RESUMO

A aderência pneu-pavimento é um parâmetro de grande importância para a avaliação do comportamento superficial do revestimento asfáltico. Desta forma, o principal objetivo deste trabalho foi correlacionar os parâmetros de macrotextura e microtextura do revestimento SMA (Stone Matrix Asphalt) obtidos dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico realizados na Avenida do Contorno em Belo Horizonte. Analisou-se também a frequência de sinistros de trânsito antes e após a execução do revestimento SMA. Para complementar foi aplicado o questionário de caráter qualitativo e quantitativo aos motoristas de coletivos da BHTRANS. O método ADSR (Action Design Science Research) aplicado na pesquisa proporcionou a integração dos objetivos desejados, no sentido de identificar percepções de melhoria na segurança viária no trecho de estudo. Na sequência, identificou-se que a média anual de sinistros foi 36% menor após a implantação do SMA em números absolutos, mas a fim de obter um índice real para avaliação, foi solicitado a BHTRANS o volume de tráfego dos anos correspondentes para ser elaborado o índice acidente/veículo. O questionário aplicado demonstrou que 89% dos motoristas entrevistados afirmaram que a aplicação do SMA trouxe ganhos na segurança durante a condução do veículo em períodos de seca e principalmente em dias chuvosos. Compreende-se que a utilização do método da pesquisa foi eficaz, por apresentar resultados satisfatórios e construtivos quanto aos benefícios de utilizarem revestimentos asfálticos que promovem mais aderência entre pneu-pavimento.

PALAVRAS-CHAVE: Macrotextura; Microtextura; SMA; ADSR; Segurança Viária.

ABSTRACT

Tire-pavement adhesion is a highly important parameter for assessing the surface behavior of asphalt paving. Thus, the main objective of this study was to correlate the macrotexture and microtexture parameters of the SMA (Stone Matrix Asphalt) paving obtained from the sand patch and British pendulum tests carried out on Avenida do Contorno in Belo Horizonte. The frequency of traffic accidents before and after the application of the SMA paving was also analyzed. To complement this, a qualitative and quantitative questionnaire was applied to BHTRANS bus drivers. The ADSR (Action Design Science Research) method applied in the research provided the integration of the desired objectives, in order to identify perceptions of improvement in road safety in the studied section. Subsequently, it was identified that the annual average of accidents was 36% lower after the implementation of the SMA in absolute numbers, but in order to obtain a real index for evaluation, BHTRANS was asked for the traffic volume of the corresponding years to calculate the accident/vehicle index. The questionnaire showed that 89% of the drivers interviewed stated that the application of SMA brought gains in safety when driving the vehicle in dry periods and especially on rainy days. It is understood that the use of the research method was effective, as it presented satisfactory and constructive results regarding the benefits of using asphalt coatings that promote greater adhesion between tire and pavement.

KEY WORDS: Macrotexture; Microtexture; SMA; ADSR; Road Safety.

¹ Mestrando em Infraestrutura de Transportes UFMG, e-mail: bernardobp@live.com; bruna.beleigoli@der.mg.gov.br.

² Coordenador do Programa de Mestrado em Infraestrutura de Transportes - UFMG, e-mail: marcelo@etg.ufmg.br

³ Professor Titular do Programa de Mestrado em Infraestrutura de Transportes - UFMG, e-mail: ronderson@etg.ufmg.br



INTRODUÇÃO

Segundo a Organização Mundial da Saúde (2023) aproximadamente 1,19 milhão de pessoas morrem anualmente em sinistros de trânsito. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2015), os sinistros de trânsito no Brasil matam cerca de 45 mil pessoas por ano e deixam mais de 300 mil pessoas com lesões graves. Já os custos envolvidos em acidentes nas rodovias custam à sociedade brasileira cerca de R\$40 bilhões por ano, enquanto os acidentes nas áreas urbanas, em torno de R\$10 bilhões, sendo que o custo relativo à perda de produção responde pela maior fatia desses valores, seguido pelos custos hospitalares.

Para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020), em sua norma NBR 10697:2020 o termo sinistro de trânsito é caracterizado como qualquer evento que resulte dano ao veículo ou à sua carga e/ou em lesões a pessoas e/ou em animais, e que gera consequências de perdas materiais ou até mesmo prejuízo ao trânsito, à via ou até mesmo ao meio ambiente, e que pelo menos uma das partes está em deslocamento nas vias de fluxo de veículos ou em espaços abertos ao público.

Para Noyce et al. (2005) as condições de atrito em vias de trânsito em condições climáticas adversas é uma das principais causas de ocorrências de sinistros de trânsito na infraestrutura viária, sendo estes fatores geradores de sinistros também contidos na ABNT NBR 10697:2020, caracterizados como fatores externo (eventos climáticos) e a possibilidade de deficiência na via (baixa aderência entre pneu-pavimento). No estudo de Caliendo et al. (2007) foi analisado as ocorrências de sinistros de uma rodovia, concluindo que os sinistros fatais estão correlacionados à presença de chuva, principalmente em curvas e também propuseram a substituição da camada de pavimento flexível por uma camada que facilite a drenagem superficial, aumentando a aderência pneu/pavimento.

Desta forma, o presente trabalho visa correlacionar os parâmetros de aderência pneu-pavimento que foram coletados após a implementação do revestimento asfáltico tipo SMA (Stone Matrix Asphalt) na Avenida do Contorno em Belo Horizonte. Em seguida analisaram-se os dados de sinistros de trânsito ocorridos antes e após a execução do revestimento asfáltico tipo SMA. Para complementar foi aplicado questionário de caráter qualitativo e quantitativo aos motoristas dos transportes coletivos que trafegam na via de estudo, a fim de identificar se dispuseram percepções de melhorias após a implantação do SMA no trecho conhecido como “Tobogã da Savassi”.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Aderência Pneu-Pavimento

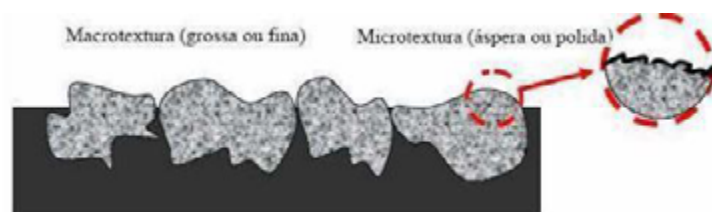
A aderência pneu-pavimento pode ser caracterizada como a associação de características de atrito e de textura do pavimento (PEREIRA, 2010). A textura é classificada pela ASTM E-867 em microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidade, classificações estas que se diferem na dimensão dos comprimentos de onda (horizontal) e amplitudes (vertical).

Na Figura 1, pode-se identificar a diferença entre as classificações de textura, sendo elas a macrotextura e a microtextura.



DOI: 10.29327/1430212.49-1

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA TIPO SMA COM ÊNFASE NO PARÂMETRO PNEU-PAVIMENTO - ESTUDO DE CASO NA AVENIDA DO CONTORNO EM BELO HORIZONTE/MG BRASIL

Figura 1. Macrotextura e microtextura em pavimentos (PERES *et al.*, 2006)

A macrotextura possui comprimentos de ondas (λ) de 0,5 mm a 50 mm, que se relaciona com a graduação, tamanho máximo, espaçamento e formato dos agregados. Já a microtextura possui comprimentos de ondas menores 0,5 mm, sendo influenciada pela rugosidade superficial dos mesmos (HALL *et al.*, 2009). Quanto às outras classificações de textura, a megatextura é caracterizada pelos desvios da superfície do pavimento decorrentes de fatores como a formação de trilhas de roda, remendo, painelas, ausência de agregado na superfície e também relacionadas a juntas e fissuras de maiores proporções. A irregularidade longitudinal se refere aos desvios da superfície de pavimento com relação a uma superfície realmente plana que proporciona a redução da resistência ao rolamento, a dinâmica do veículo, a qualidade de rolamento e o custo operacional dos veículos (LAY, 1998).

As medidas da macrotextura e microtextura (atrito) coletadas do revestimento asfáltico são fundamentais para o estudo da restauração da estrutura, parâmetros estes que são essenciais para uma melhoria na segurança viária (NOYCE *et al.*, 2005). Conforme Tabela 1, as classificações são determinadas:

Tabela 01. Classificação Macrotextura (ABPV,1999)

Classe	Altura média de mancha de areia (mm)
Muito Fina ou muito fechada	HS* \leq 0,20
Fina ou fechada	0,20 < HS \leq 0,40
Média	0,40 < HS \leq 0,80
Grosseira ou aberta	0,80 < HS \leq 1,20
Muito grosseira ou muito aberta	HS > 1,20

Tem-se recomendado a macrotextura dos pavimentos asfálticos na faixa entre 0,6mm e 1,2mm de altura média da mancha de areia (ABPV, 1999). A macrotextura é uma das características mais importantes e que afetam a aderência, principalmente para velocidades de deslocamento acima de 50km/h (BERNUCCI *et al.*, 2007).

Na avaliação da microtextura do revestimento asfáltico utilizando o equipamento de pêndulo britânico (ASTM E 303) é possível determinar o valor de resistência à derrapagem (VRD), mundialmente conhecido com BPN (British Pendulum Number). Na tabela a seguir é apresentado as classificações conforme DNIT (2006), em referência aos valores de resistência à derrapagem (VRD).

Tabela 02. Classificação Microtextura (DNIT, 2006)

Classe	Valor de resistência à derrapagem
Perigosa	< 25
Muito lisa	25 \leq VRD \leq 31



Bernardo de Brito Pereira,
Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli,
Marcelo Franco Porto,
Ronderson Queiroz Hilário

Lisa	32 <= VRD <= 39
Insuficientemente rugosa	40 <= VRD <= 46
Medianamente rugosa	47 <= VRD <= 54
Rugosa	55 <= VRD <= 75
Muito rugosa	VRD > 75

Relação Entre Variáveis

O conceito de correlação já aparece no trabalho de Bravais (1846), entretanto, foi Pearson (1896) quem descreveu a fórmula conhecida como “Coeficiente de Pearson” (MARIA; KOTZ, 2001). O coeficiente de correlação de Pearson (ρ) é uma medida de intensidade e direção de uma relação linear entre duas variáveis x e y .

$$\rho = \frac{1}{(n-1)} \sum \frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \quad (1)$$

Sendo:

ρ : coeficiente de correlação Pearson;

n : frequência de observações;

\sum : soma;

x_i e y_i : valor individual de x ou y ;

\bar{x} e \bar{y} : média;

s_x e s_y : desvio padrão.

O valor numérico de ρ varia de -1 a $+1$. Quando ρ estiver próximo de -1 , indica uma correlação negativa forte e, próximo de $+1$, uma correlação positiva forte. Um valor de ρ próximo a 0 indica que há correlação fraca, ou ainda, que não há correlação (JOHNSON; BHATTACHARYYA, 2019).

MATERIAIS E MÉTODOS

Metodologia ADSR

A ADSR (Action Design Science Research), foi o método científico adotado para o desenvolvimento desta pesquisa. A aplicação da Action Design Science Research se define em uma sequência representada em 4 estágios definidos: Diagnóstico, Design (Projeto), Implementação e Evolução (HEVNER & MALLURKEY, 2019).

Sein et al. (2011) cita que a combinação entre a Design Science e a Pesquisa-Ação se resulta na ADSR (Action Design Science Research). E quando ADSR é aplicada, pode contribuir para a construção de artefatos (DRESCH et al., 2015). Em resumo, o artefato (Figura 3) é “a organização dos componentes do ambiente interno para atingir objetivos em um determinado ambiente externo” (DRESCH et al., 2015).

DOI: [10.29327/1430212.49-1](https://doi.org/10.29327/1430212.49-1)

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA TIPO SMA COM ÊNFASE NO PARÂMETRO PNEU-PAVIMENTO - ESTUDO DE CASO NA AVENIDA DO CONTORNO EM BELO HORIZONTE/MG BRASIL

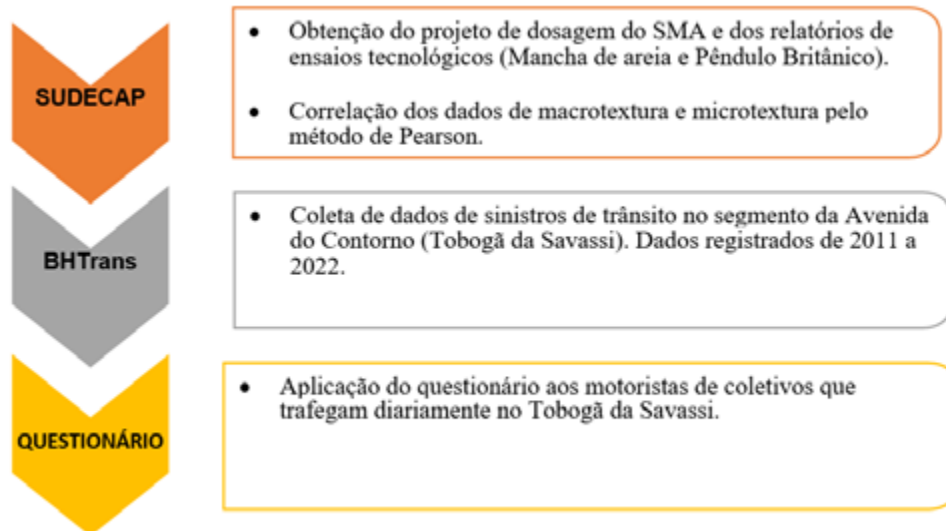


Figura 3. Artefato da pesquisa (AUTOR, 2023)

Questionário de Validação

Com o objetivo de identificar evidências reais diante dos relatos dos usuários que trafegam no trecho de estudo, a construção do questionário teve como premissa desenvolver perguntas abertas com características qualitativas e quantitativas. O principal objetivo do questionário é obter um maior número possível de informações sobre as percepções dos motoristas quanto as consequências percebidas antes e pós-execução do SMA, na Avenida do Contorno.

DESENVOLVIMENTO

Trecho de Estudo

A Avenida do Contorno, via urbana que circunda a região central da cidade de Belo Horizonte, possui um papel importante no desenvolvimento da capital mineira, desde de sua implantação no século XX. Popularmente chamado de “Tobogã da Savassi”, trecho da Avenida do Contorno que está localizado entre os bairros Savassi e Funcionários, é formado por 2 rampas de aproximadamente 150 metros de comprimento cada, com uma inclinação longitudinal $>12\%$ e 3 faixas por sentido.

Implantação do Revestimento Tipo SMA

Em junho de 2020 a SUDECAP (Superintendência de Desenvolvimento da Capital), realizou a substituição da camada asfáltica tipo CBUQ faixa “C” CAP 50/70, para a mistura asfáltica com granulometria “descontínua”, conhecida de SMA (Stone Matrix Asphalt), a fim de favorecer a segurança viária, em função do melhoramento do atrito entre o pneu e pavimento. A composição



Bernardo de Brito Pereira,
Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli,
Marcelo Franco Porto,
Ronderson Queiroz Hilário

granulométrica dos agregados constituintes da mistura asfáltica SMA (Figura 4) é composta por 61,15 % de Brita Zerão; 11,38% de Pó de Gnaisse; 19,91% de Pó de Calcário; 1,90% de Cal; 0,47% de Fibra e 5,20% de CAP 60/85

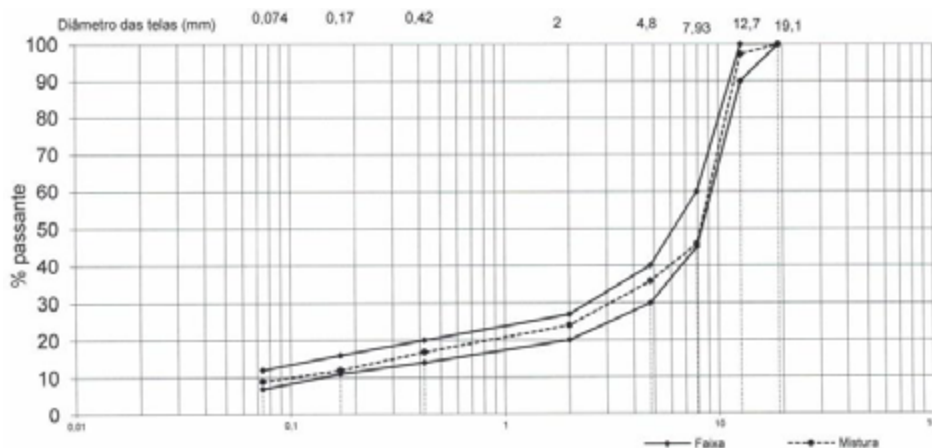


Figura 4. Curva granulométrica SMA (SUDECAP, 2019)

Para a Napa (2002), a principal vantagem do SMA é a longa vida útil proporcionada pela melhor performance deste revestimento em relação a misturas asfálticas convencionais, o que, a longo prazo, reduz os custos com recuperação e reabilitação do pavimento.

Durante 2 semanas do mês de junho de 2020, foram realizados os serviços de fresagem funcional da camada existente, corte esse com 4 cm de profundidade. Em seguida, para ocorrer a aderência entre camadas existente e a ser aplicada, foi executada a aplicação de emulsão asfáltica tipo RR-1C. Após a imprimação da superfície com emulsão asfáltica, o revestimento tipo SMA foi aplicado com espessura final compactada de 4 cm.



Figura 05. Aplicação do SMA (SUDECAP, 2020)

Ensaio de Macrotextura e Microtextura

Os pontos de ensaios, tanto para o de macrotextura e microtextura, foram organizados da seguinte forma:



DOI: 10.29327/1430212.49-1

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA TIPO SMA COM ÊNFASE NO PARÂMETRO PNEU-PAVIMENTO - ESTUDO DE CASO NA AVENIDA DO CONTORNO EM BELO HORIZONTE/MG BRASIL

- Rampa 1 – próximo ao número nº 5326 antes da esquina com a Rua Piauí – Pista Direita/Esquerda, Faixa 1/2/3, Trilha de roda externa;
- Rampa 2 – próximo ao número nº 5404 depois da esquina com a Rua Piauí – Pista Direita/Esquerda, Faixa 1, trilha de roda externa.

Para a avaliação da macrotextura foi adotado o método de mancha de areia (ASTM E965-15,2018) e para verificação da microtextura (ASTM E 303-1993), conforme figuras apresentadas abaixo.



Figura 06. Ensaio mancha de areia (SUDECAP, 2022)



Figura 07. Ensaio Pêndulo Britânico (SUDECAP, 2022)

Para cada faixa de rolamento foi coletado uma amostra de 5 resultados de mancha de areia em pontos distintos, normalmente nas extremidades interna e externa das faixas (trilhas de rodas). O diâmetro médio D_m é o resultado da média obtida pelas cinco medições. A altura da mancha de areia (H_m) é expressa conforme equação 1:

$$H_m = 4V / \pi D^2 \quad (2)$$

Sendo:

H = Espessura média da macrotextura do pavimento, mm;

V = Volume da areia, mm³; e

D = Diâmetro médio da área recoberta pela areia, mm.

Na avaliação da microtextura, foram realizadas 5 medidas de coeficiente de atrito (VRD) próximos aos pontos onde foram realizados os ensaios de macrotextura. O método empregado foi o do Pêndulo Britânico (figura 07), e o procedimento está recomendado pela norma ASTM E 303, 1993 (Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester).

Esse ensaio é considerado dinâmico e de impacto e consiste em mensurar a perda de energia quando a sapata de borracha do pêndulo desliza sobre a superfície de teste. A tabela 3 apresenta os valores médios correspondentes aos ensaios de macrotextura e microtextura do segmento de estudo.

Tabela 3. Dados dos ensaios de textura do trecho de estudo (AUTOR, 2023)

SEGMENTO	MANCHA DE AREIA HS(mm) - MÉDIA	VALOR DE RESISTÊNCIA A DERRAPAGEM (MÉDIA)
AV CONTORNO - RAMPA 01 - PD - FX 01	0,51	58
AV CONTORNO - RAMPA 01 - PD - FX 02	1,1	54
AV CONTORNO - RAMPA 01 - PD - FX 03	1,62	50



Bernardo de Brito Pereira,
 Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli,
 Marcelo Franco Porto,
 Ronderson Queiroz Hilário

AV CONTORNO - RAMPA 01 - PE - FX 01	0,72	70
AV CONTORNO - RAMPA 01 - PE - FX 02	0,98	70
AV CONTORNO - RAMPA 01 - PE - FX 03	0,8	56
AV CONTORNO - RAMPA 02 – PD	1,1	108
AV CONTORNO - RAMPA 02 – PE	1,41	64

Com o objetivo de apresentar o resultado da correlação pelo método Pearson entre as variáveis de macrotextura e microtextura das rampas 1 e 2, está apresentado o respectivo gráfico de correlação.

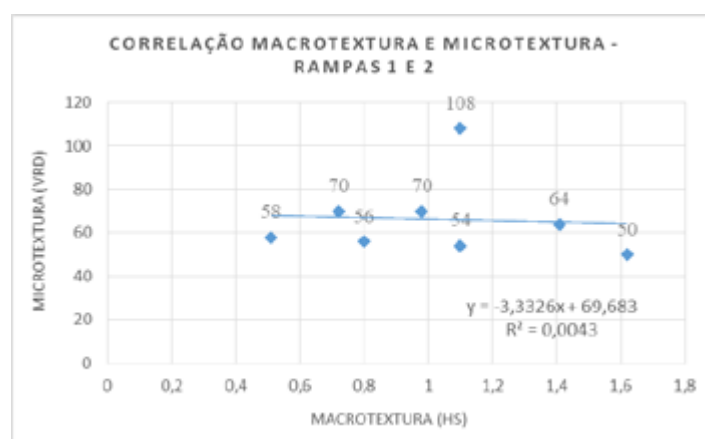


Figura 08. Correlação macrotextura x microtextura (AUTOR, 2023)

Conforme figura apresentada, é possível identificar que os valores de microtextura (eixo y) possuem um comportamento heterogêneo na medida que a variável X é crescente. Com o desenvolvimento da equação de regressão linear no programa Excel, conclui-se que a interação entre as variáveis de textura resulta em uma equação decrescente (variável X negativa) e o valor do coeficiente de Pearson resultante é de $R^2=0,0043$, igual a $\rho= 0,0655$, valor que demonstra ser positivo mas com baixa intensidade e pode ser visto pelo coeficiente de correlação (Johnson e Bhattacharyya, 2109). A baixa correlação é resultado de não haver uma proporcionalidade direta entre as variáveis de estudo, mesmo quando os valores de macrotextura apresenta ser crescente, a variável y (microtextura) se comporta de forma desordenada, não demonstrando uma tendência na direção dos valores da variável macrotextura.

Sinistros de Trânsito no Segmento da Pesquisa

A análise de sinistros de trânsito foi realizada com os dados provenientes do portal web da BHTrans (Empresa de Transporte e Trânsito de Belo Horizonte), que disponibiliza em dados abertos diversas informações relacionadas a acidentes, trânsito, sinistros, boletim de ocorrência, etc. Para a identificação da frequência de sinistros, foi realizada em cada planilha do ano referente os seguintes filtros:

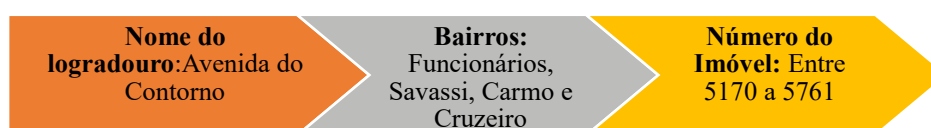


Figura 09. Sequência para coleta de ocorrências de sinistros (AUTOR, 2023)



DOI: 10.29327/1430212.49-1

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA TIPO SMA COM ÊNFASE NO PARÂMETRO PNEU-PAVIMENTO - ESTUDO DE CASO NA AVENIDA DO CONTORNO EM BELO HORIZONTE/MG BRASIL

Com os filtros realizados conforme sequência adotada, obteve-se os quantitativos de frequências absoluta de sinistros de trânsito conforme tabela 04.

Tabela 04. Panorama de ocorrências de sinistros de trânsito no Tobogã da Savassi (AUTOR, 2023)

SINISTROS DE TRÂNSITO - AVENIDA DO CONTORNO - TOBOGÃ DA SAVASSI												
2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020 (Pré-obra)	2020 (Pós-Obra)	2021	2022
13	10	11	14	6	6	11	10	18	2	0	7	10

Entre os anos de 2011 a 2022 o número total de sinistros foi de 118 ocorrências, resultando em uma média de 11 sinistros/ano no período pré SMA e após a implantação do SMA a média foi de 7 sinistros/ano. Para alcançar uma análise conclusiva quanto o real impacto do novo revestimento asfáltico na evolução dos sinistros de trânsito, foi solicitado à BHTRANS (Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte) os dados do volume de tráfego do segmento do estudo entre os anos 2011 a 2022.

Segundo IBGE (2024), entre os anos de 2011 a 2022 a frota de veículos na capital mineira alcançou um percentual de aumento de 81 %, sendo que em 2011 o total de veículos era de 1.438.723, e em 2022 o total era de 2.599.029. Portanto, espera-se que devido a este aumento significativo da frota de veículos em Belo Horizonte, juntamente com a frequência de sinistros possa resultar em um índice acidente/veículos satisfatório a segurança viária local.

Evolução – Questionário Aplicado aos Motoristas de Coletivos Urbano

Conforme informação fornecida pela BHTRANS, as linhas de ônibus sob comando da empresa Sandra é a que possui maior números de viagens que percorre no segmento de estudo desta pesquisa, sendo um quantitativo superior a 65 viagens a cada dia útil, e aos sábados e domingos/feriados um número superior a 50 viagens no total. Em razão do quantitativo de viagens realizadas pela viação Sandra, foram aplicadas aos 9 motoristas as seguintes perguntas, conforme Tabela 5 a seguir.

Tabela 05. Questionário aplicado aos motoristas da viação Sandra (AUTOR, 2023)

1	Nome
2	Há quanto tempo você trafega no tobogã da Savassi?
3	Quantos dias por semana e qual frequência você trafega pelo tobogã?
4	Você trabalha em qual período?
5	Em média quantas pessoas estão no ônibus quando passa pelo tobogã da Savassi?
6	Para você, qual é o período de grande fluxo no tobogã da Savassi?
7	Sobre o asfalto do tobogã da Savassi, você sabia que ele foi substituído por outro no ano de 2020?
8	Novo asfalto aplicado trouxe mais segurança ao dirigir o ônibus?
9	O asfalto aplicado tem o nome de SMA (stone matrix asphalt), ele possui a condição de dar mais aderência entre os pneus do veículo e o próprio asfalto. Para você é interessante? porque?



Bernardo de Brito Pereira,
Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli,
Marcelo Franco Porto,
Ronderson Queiroz Hilário

Você já passou por alguma dificuldade na condução do veículo no tobogã da Savassi? ex:
10 congestionamento no período de chuva, ônibus derrapando? etc. quando aconteceu?

11 Você já presenciou algum tipo de acidente no tobogã da savassi?

Você já percebeu que quando está chovendo o asfalto do tobogã da Savassi tem uma aparência de
12 que não está com poças d'água, mais "seco"?

Importante característica dos motoristas entrevistados, é que cerca de 77 % deles (7 motoristas) já percorrem diariamente o trecho do Tobogã da Savassi a mais de 10 anos. Foi identificado que 89 % dos motoristas participantes do questionário possuem a percepção que a execução do SMA no trecho do Tobogã da Savassi trouxe benefícios para a segurança viária.

O motorista entrevistado de nº 6 cita "que a intervenção no pavimento trouxe mais estabilidade aos veículos". Outro comentário importante de um dos entrevistados (motorista de nº 3) foi que "o SMA trouxe mais segurança principalmente na descida e na subida em dias de chuva, pois antigamente patinava muito". Conforme as características de textura esperadas na mistura SMA e diante das análises aqui apresentadas, aplicou-se a seguinte pergunta, "Você já percebeu que quando está chovendo o asfalto do Tobogã da Savassi tem uma aparência que não está com poças d'água, mais seco?".

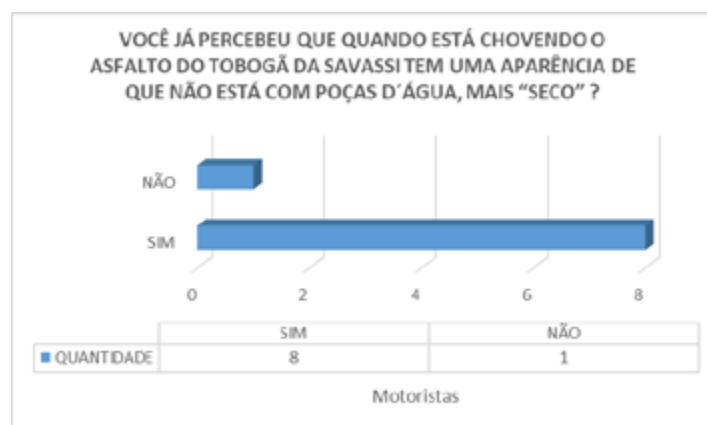


Figura 10. Análise respostas do questionário (AUTOR, 2024)

Em resumo 8 dos no 9 motoristas entrevistados afirmam que o SMA aplicado no Tobogã da Savassi possui em períodos de chuvas uma aparência mais "seca". Característica essa que é influenciada pela macrotextura do SMA, em função de sua granulometria aberta que proporciona a redução do efeito de hidroplanagem, corroborando com o estudo de Rodrigues Filho (2016), favorecendo assim, a possibilidade de redução de ocorrências de sinistros de trânsito em períodos de chuva.

CONSIDERAÇÕES

Este estudo propôs analisar inicialmente a correlação entre os parâmetros de macrotextura e microtextura do revestimento asfáltico SMA juntamente com outros estudos complementares em prol de verificar o efeito resultante da aplicação do revestimento SMA na Avenida do Contorno. A correlação entre os parâmetros de textura foi desenvolvida com base nos princípios estatísticos de Pearson, no qual os resultados obtidos mostraram que o relacionamento entre as variáveis é positiva, mas de baixa intensidade ($0 < \rho \leq 0,5$). A ADSR (Action Design Science Research),



DOI: [10.29327/1430212.49-1](https://doi.org/10.29327/1430212.49-1)

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA TIPO SMA COM ÊNFASE NO PARÂMETRO PNEU-PAVIMENTO - ESTUDO DE CASO NA AVENIDA DO CONTORNO EM BELO HORIZONTE/MG BRASIL

metodologia implementada na pesquisa, proporcionou integrar etapas para a análise dos resultados no quesito de segurança viária no segmento de estudo.

Em sequência nas análises dos objetivos secundários propostos, o panorama das ocorrências de sinistros de trânsito entre os anos de 2011 a 2022 foi desenvolvido com base nos dados obtidos pela BHTRANS. Encontrou-se que a média anual de sinistros registrados após aplicação do SMA no Tobogã da Savassi foi 36 % menor quando comparado ao período sem o revestimento tipo SMA em números absolutos. Mas a fim de obter um índice real para avaliação, foi solicitado a BHTRANS o volume de tráfego dos anos correspondentes com o objetivo de ser elaborado o índice acidente/veículo por ano. Espera-se que devido ao aumento crescente da frota de veículos na cidade de Belo Horizonte, que foi superior a mais de 81 % entre os anos de 2011 e 2022 o índice de sinistros de trânsito seja favorável para a segurança viária (IBGE, 2024).

Na etapa de evolução do método desenvolveu-se o questionário qualitativo e quantitativo com objetivo de obter percepções dos motoristas quanto às possíveis melhorias na segurança viária após a implantação do asfalto SMA (Stone Matrix Asphalt). Dos motoristas entrevistados, 89 % afirmaram que a execução do SMA trouxe ganhos na segurança ao conduzir o veículo, tanto nos períodos de seca e principalmente em dias chuvosos, pelo asfalto proporcionar mais estabilidade e redução de poças d'água na superfície do pavimento.

Em vista das percepções coletadas dos motoristas da BHTRANS que trafegam diariamente no Tobogã da Savassi, compreende-se que a percepção humana está ao encontro dos resultados apresentados até aqui encontrados sobre a redução do número de sinistros de trânsito após a aplicação do SMA. Contudo, foi possível identificar a eficácia do método elaborado para o desenvolvimento dessa pesquisa, no qual procurou-se combinar dados técnicos do revestimento SMA, de sinistros de trânsito e percepções dos motoristas para identificação de melhoria na segurança viária no segmento de estudo, após aplicação do revestimento SMA.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig).

ACKNOWLEDGMENT

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) and Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Pesquisas de sinistros de trânsito-terminologia. Norma Técnica.** Rio de Janeiro, 2020.

ABPV – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO. **Informativo técnico sobre avaliação da resistência à derrapagem através de aparelhagem portátil.** Boletim Técnico, Rio de Janeiro, n. 18, 1999.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATI, J. A. P. e Soares, J. B. (2007). **Pavimentação Asfáltica.** Formação Básica para Engenheiros. Petrobras. ABEDA. Rio de Janeiro.

BRAVAIS, A. **Sur les probabilités des erreurs de situation d'un point [on the probability of errors in the position of a point].** Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France, v. 9, p. 255-332, 1846.



Bernardo de Brito Pereira,
Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli,
Marcelo Franco Porto,
Ronderson Queiroz Hilário

CALIENDO, Ciro; GUIDA, Maurizio; PARISI, Alessandra. **A crash-prediction model for multilane roads**. Accident Analysis & Prevention, v. 39, n. 4, p. 657-670, 2007.

CORLEY-LAY, Judith B. **Friction and surface texture characterization of 14 pavement test sections in Greenville, North Carolina**. Transportation Research Record, v. 1639, n. 1, p. 155-161, 1998.

DNIT (2006) **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. IPR. Rio de Janeiro, RJ.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. **Uma análise distintiva entre o estudo de caso, a pesquisa-ação e a design science research**. Revista Brasileira de Gestão de Negócios, v. 17, p. 1116-1133, 2015.

HALL, J. W. *et al.* **Guide for pavement friction**. Final Report for NCHRP Project, v. 1, p. 43, 2009.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-horizonte/pesquisa/22/28120?ano=2022>** Acesso em: 24 jan. 2024.

IPEA (2015) **Estimativa dos custos dos acidentes de trânsito no Brasil com base na atualização simplificada das pesquisas anteriores do Ipea**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília.

JOHNSON, Richard A.; BHATTACHARYYA, Gouri K. **Statistics: principles and methods**. John Wiley & Sons, 2019.

MARIA, Dominique Drouet KOTZ, Samuel. **Correlation and dependence**. World Scientific, 2001.

MULLARKEY, Matthew T.; HEVNER, Alan R. **An elaborated action design research process model**. European Journal of Information Systems, v. 28, n. 1, p. 6-20, 2019.

NAPA – National Asphalt Pavement Association (2002) – **Designing and Construction Mixtures SMA – State-of-The-Practise**. Quality Improvement Series 122 – Laham, MD, EUA.

Noyce, A. D.; H. U. Bahia; J. M. Yambó e G. Kim (2005) **Incorporating road safety into pavement management: maximizing as-phalt pavement surface friction for road safety improvements - Draft Literature Review and State Surveys**. Midwest Regional University Transportation Center, Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory, Wisconsin.

OMS (2023) **Global status report on road safety 2023**. Organização Mundial da Saúde, Genebra, Suíça.

PEREIRA, C. A. (2010) **Análise da Aderência Pneu-Pavimento em Rodovias dos Estados de Pernambuco e da Paraíba com Elevado Índice de Acidentes**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia Civil e Geotecnia. Recife –PE.

PERES, Ricardo; SILVA, Gilberto Teixeira da; MERIGHI, Joao Virgílio. **Influência da Natureza da Superfície de contato na geração de aderência nos pavimentos aeroportuários**. V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos, 2006.

PRANJIC, Ivana *et al.* Pavement surface macrotexture analysis. In: **Proceedings of the 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA**. 2018. p. 359-367.

Rodrigues Filho, O. S. (2006) **Características de Aderência de Revestimentos Asfálticos Aeroportuários –Estudo de caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

Sein, M. K., Henfridsson, O., Purao, S., Rossi, M., & Lindgreen, R. (2011). **Action design Research**. MIS Quarterly, 35(1), 37-56.

Notas de Rodapé

*HS** - Significa High Sand, termo que corresponde à altura de areia ou profundidade de areia, referente ao principal parâmetro de avaliação do ensaio de macrotextura (macha de areia).



INVESTIGAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A PRESENÇA DE BURACOS E O PADRÃO DE CONDUÇÃO VEICULAR

Alison kaio Dantas Pereira¹; Thiago de Jesus de Souza² & Wellington Lorrán Gaia Ferreira³

RESUMO

Os sinistros de trânsito ocorrem em função de diversos fatores, variando desde as condições mecânicas dos veículos, até o estado físico e mental do condutor. No entanto, a infraestrutura viária também é um fator que pode afetar o comportamento do motorista e, conseqüentemente, impactar a segurança. Nesse contexto, a presença de buracos na superfície dos pavimentos, alinhada às condições de tráfego, podem afetar a dinâmica de condução dos veículos, e gerar pontos potenciais para a ocorrência de sinistros. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a relação entre a presença de buracos e o padrão de condução veicular. Em um trecho de aproximadamente 38 km da RN-117, foram catalogados quatro (04) buracos com características distintas (dimensões e distribuição dentro da faixa de rolamento), além de georreferenciados. Por meio de um sistema embarcado, a geolocalização da trajetória veicular e as acelerações transversais e longitudinais foram monitoradas com certa precisão a fim de compreender se a presença de buracos interfere no padrão de condução dos motoristas. Os resultados indicam que o tamanho e a posição dos buracos podem afetar o comportamento do condutor gerando zonas potencialmente perigosas. Portanto, é fundamental identificar esses buracos a fim de proporcionar maior segurança nas vias, seja realizando manutenções nesses pontos ou sinalizando o usuário dos perigos no trecho.

PALAVRAS-CHAVE: buracos, segurança viária, condução veicular, trajetória veicular.

ABSTRACT

Traffic accidents are influenced by various factors, ranging from the mechanical conditions of vehicles to the physical and mental state of the driver. However, road infrastructure is also a factor that can affect driver behavior and, consequently, impact safety. In this context, the presence of potholes on road surfaces, combined with traffic conditions, can affect the driving dynamics of vehicles and create potential points for accidents to occur. This study aims to evaluate the relationship between the presence of potholes and vehicular driving patterns. Along a stretch of approximately 38 km of RN-117, four (04) potholes with distinct characteristics (dimensions and distribution within the lane) were cataloged and georeferenced. Through an onboard system, the geolocation of the vehicle's trajectory and transverse and longitudinal accelerations were monitored with certain precision to understand if the presence of potholes interferes with driver behavior. The results indicate that the size and position of potholes can affect driver behavior, generating potentially hazardous zones. Therefore, it is essential to identify these potholes in order to provide greater safety on roads, either by carrying out maintenance at these points or by alerting users to the dangers in the stretch.

KEY WORDS: potholes, road safety, vehicular driving, vehicle trajectory.



1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2021), os sinistros de trânsito causam aproximadamente 1,3 milhão de mortes e 50 milhões de feridos por ano em todo o mundo. A OMS (2021) estima que cerca de 13 milhões de vidas serão perdidas e 500 milhões de pessoas ficarão feridas em sinistros de trânsito já na próxima década. Segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2022), entre os anos de 2021 e 2022 foram registrados 64.447 sinistros, sendo 52.948 com vítimas, entre mortos ou feridos, em rodovias federais que cortam o Brasil. Essas rodovias representam apenas 30,8% de toda a malha rodoviária pavimentada do país, o que indica que o número de sinistros pode ser subestimado. Esses dados apontam para o grave problema relacionado a ausência de segurança viária que vem provocando milhares de vítimas.

As investigações relacionadas aos sinistros de trânsito apontam para um problema multifatorial, pois envolvem diferentes variáveis como geometria da via, condição mecânica do veículo, condições climáticas e estado físico e mental do condutor. Além disso, a infraestrutura viária, associada a esses fatores, pode afetar a segurança viária (RIBEIRO *et al.*, 2019; MAIA, 2020; HE *et al.*, 2021). Nesse sentido, Larocca (2018), Choudhari e Maji (2019) e Rodrigues (2022) mencionam que a condição do pavimento, a geometria da via e a ausência de sinalização podem ter impacto no padrão de condução do motorista.

No que se refere à condição da rodovia, Kumar e Gupta (2021) citam que um fator que impacta, diretamente, os sinistros de trânsito é a condição da superfície do pavimento. a CNT (2023) cita que pontos críticos na via, como presenças de buracos, podem interferir no comportamento do condutor e, conseqüentemente, na ocorrência de sinistros. Ainda de acordo com a CNT (2023), o relatório anual aponta que aproximadamente 57% da extensão das rodovias apresenta algum problema relacionado a infraestrutura do pavimento. Por isso, os tamanhos e distribuições dos defeitos no pavimento, associados a mudança da trajetória do condutor, devem ser investigados.

Nesse sentido, o desenvolvimento de dispositivos embarcados para avaliar o padrão de condução veicular tem sido investigado. Além disso, o uso de diferentes sensores acelerômetros e de *Global Positioning System (GPS)* aprimoram a qualidade dos dados para monitorar a segurança viária e a estrutura do pavimento (UUS *et al.*, 2016 e MAZZEI e DI LELLIS, 2022). Para além dos fatores relacionados ao estudo da superfície e padrão de condução, Arman e Tampère (2022) citam que a utilização dos dispositivos embarcados transforma o sistema numa grande base de dados de aquisição constante, o que pode auxiliar na gerência e manutenção das vias consideradas críticas.

Nesse contexto, é importante compreender como a presença de buracos no pavimento pode interferir no comportamento do motorista e no desvio da trajetória considerada ideal. Além disso, a investigação desses defeitos pode ser útil para manter a segurança nas vias, seja no auxílio de medidas relacionadas à gerência dos pavimentos e à manutenção das vias, seja na localização dos pontos críticos, com o objetivo de mapear e informar previamente aos motoristas. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é investigar a relação entre a presença de buracos e o padrão de condução veicular. Para tanto, foi desenvolvido um sistema embarcado de baixo custo, que tem como objetivo coletar o padrão de condução dos veículos com certa precisão, por meio de um conjunto de



DOI: 10.29327/1430212.49-86

INVESTIGAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A PRESENÇA DE BURACOS E O PADRÃO DE CONDUÇÃO VEICULAR

módulos sensíveis integrados. Os dados do dispositivo foram confrontados com buracos na via, que, por sua vez, foram previamente aferidos e georreferenciados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

O estudo foi realizado no estado do Rio Grande do Norte (RN), entre os municípios de Caraúbas e Mossoró, as duas cidades estão localizadas na região do Oeste Potiguar. A rodovia selecionada foi a RN-117. A Figura 1 apresenta um mapa de localização da área de estudo. O trecho foi escolhido devido a grande quantidade e variedade de defeitos do tipo buraco, além dos relatos frequentes de sinistros. Além disso, a Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) está localizada na cidade de Caraúbas, o que torna o trecho do estudo estratégico para os que trafegam da cidade até a região de Mossoró.

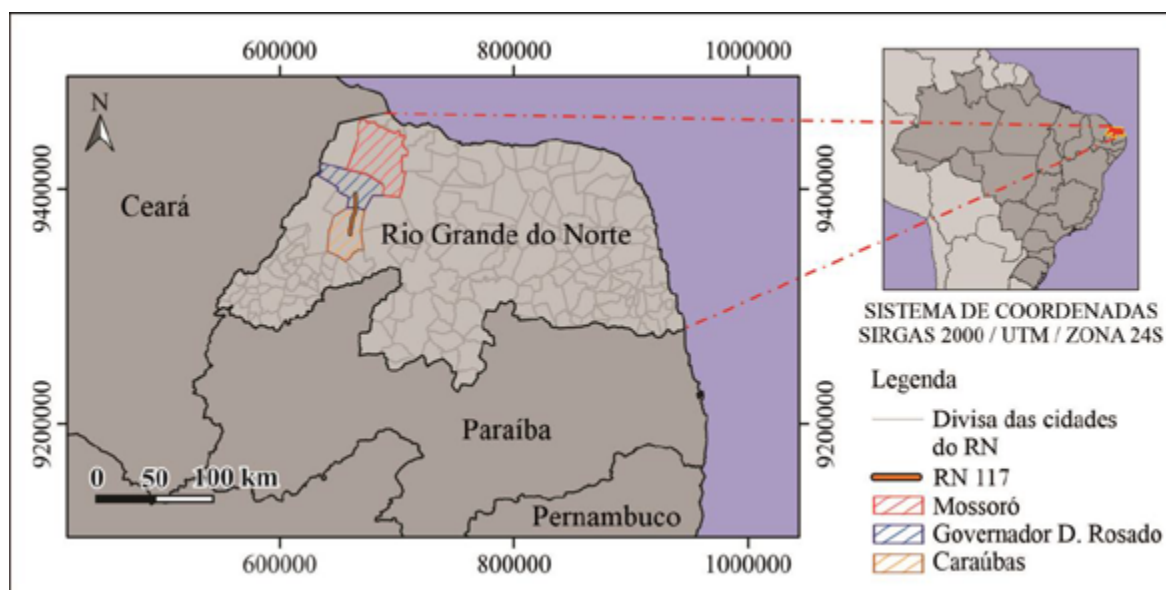


Figura 1 - Mapa da região de estudo.

A pesquisa foi realizada em um trecho de cerca de 38 km, entre as cidades de Caraúbas/RN e Governador Dix-Sept Rosado/RN (Figura 1). Trata-se de trecho de via simples de mão dupla, de 6,0 m de largura (3,0 m para cada faixa de rolamento), em tangente, sem acostamento, com sinalização horizontal deficiente. Devido a grande quantidade de buracos, optou-se por avaliar quatro (04), no total. A Figura 2 mostra um recorte da área de pesquisa, nomeando os buracos de B1 (buraco número 1) até B4 (buraco número 4).

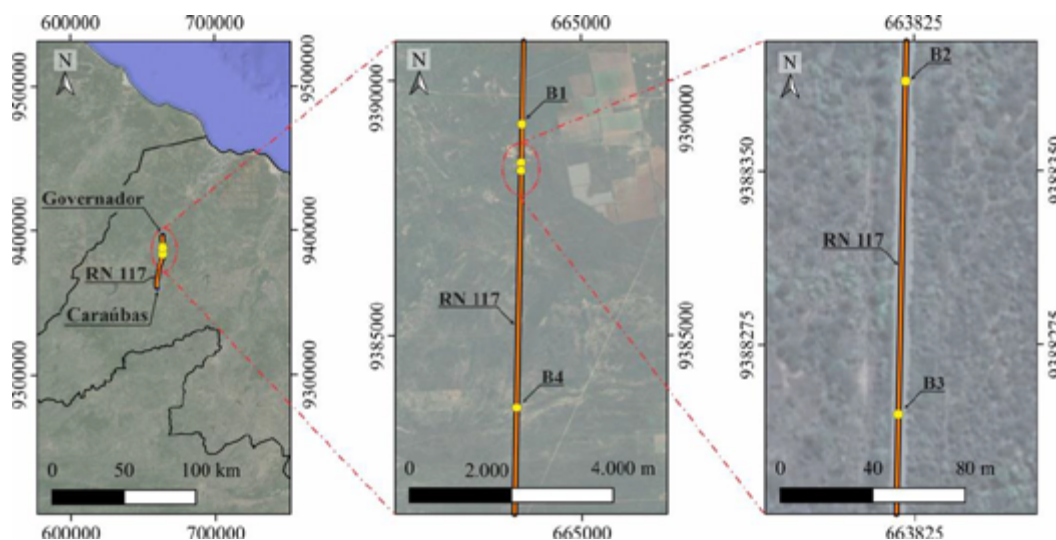
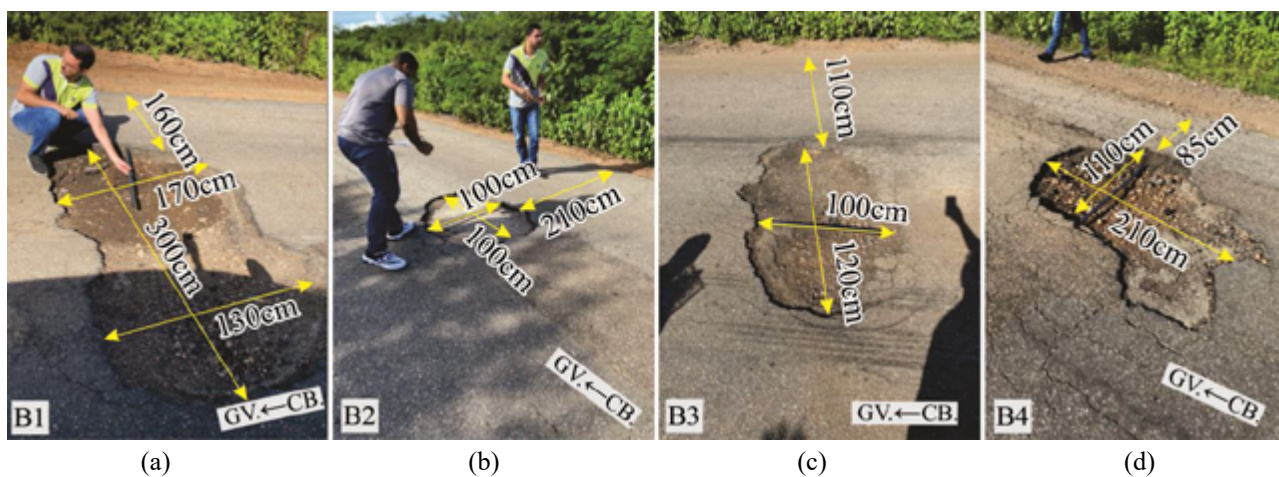


Figura 2 - Trecho de estudo

Os buracos selecionados para avaliação possuem características diversas em termos de tamanho, profundidade e distância da borda externa da rodovia. Na Figura 3, é apresentado cada buraco individualmente, indicando os sentidos da via. Na Tabela 1, um resumo das características de cada buraco.



Legenda: a abreviação GV. se refere a cidade de Governador Dix-Sept Rosado, e CB., a Caraúbas.

Figura 3 - Imagem dos seis (06) buracos catalogados para análise

Tabela 1 - Resumo das características dos buracos

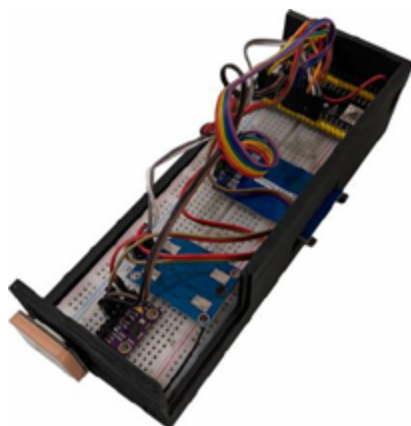
Buraco	Profundidade no Centro (cm)	Maior dimensão em X (cm)	Maior dimensão em Y (cm)	Distância da borda externa (cm)
B1	13,00	170,00	300,00	160,00
B2	3,50	100,00	100,00	210,00
B3	9,00	120,00	100,00	107,00
B4	13,00	110,00	210,00	85,00

DOI: [10.29327/1430212.49-86](https://doi.org/10.29327/1430212.49-86)INVESTIGAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A PRESENÇA DE BURACOS E
O PADRÃO DE CONDUÇÃO VEICULAR

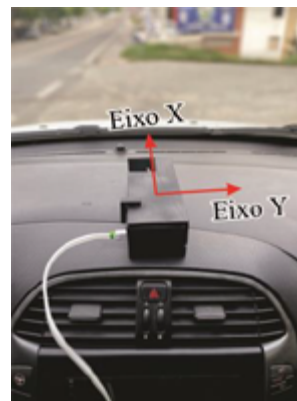
2.2. Coleta do Padrão de Condução

Para compreender o padrão de condução veicular, foi desenvolvido um sistema embarcado que coleta informações relacionadas à geolocalização do trajeto do veículo com certa precisão e à aceleração transversal e longitudinal. Essas informações foram confrontadas com a localização e as características (tamanho e distribuição) dos quatro buracos catalogados. A finalidade da análise é obter padrões de comportamento do condutor na presença dos defeitos no pavimento. O dispositivo embarcado (Figura 4a) é formado por uma placa ESP32, integrado com um *Global Positioning System (GPS)*, que retorna a geolocalização do veículo ao longo da rodovia, um módulo acelerômetro de nove eixos, responsável pela captura dos deslocamentos do veículo na faixa de rolamento, e um módulo *Micro SD* para armazenamento das informações. Trata-se de um equipamento de baixo custo, possível de ser embarcado em diversos veículos.

Devido a dificuldade de realizar estudos naturalistas em campo, as coletas foram realizadas com dois motoristas distintos, em dois veículos de passeio, de porte pequeno, com mecânica, dimensões e características similares. No total, foram realizadas três (03) coletas de dados. Apesar de compreender que, estatisticamente, a amostra pode não representar uma população, este estudo inicial foi realizado com o intuito de verificar se há relação entre defeitos no pavimento e condução do motorista. É importante ressaltar que o equipamento foi posicionado no centro do veículo, sobre o painel, em todas as coletas (Figura 4b).



(a) Dispositivo montado



(b) Dispositivo em campo

Figura 4 - Dispositivo embarcado

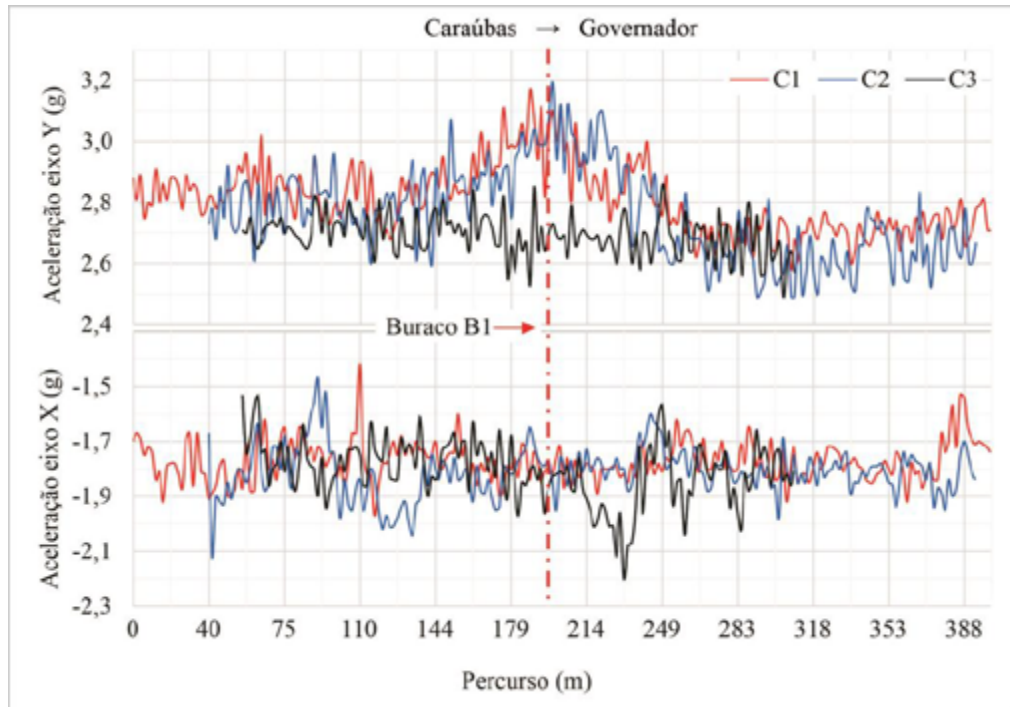
3. RESULTADOS

3.1. Influência do Tamanho do Buraco no Padrão de Condução Veicular

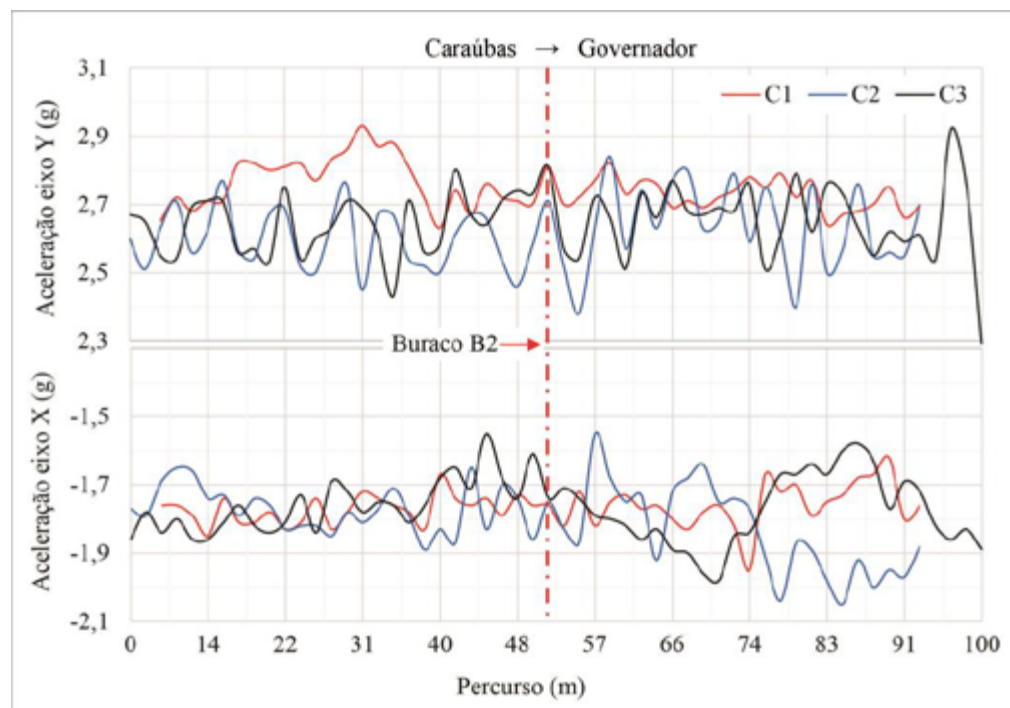
A Figura 5 apresenta os resultados de aceleração no eixo X (longitudinal à pista) e no eixo Y (transversal à pista) confrontando os dados do buraco 1 (B1) com o buraco 2 (B2). A letra C indica o percurso realizado por cada um dos três motoristas, avaliando o comportamento deles alguns metros antes e após a presença dos buracos.



Alison kaio Dantas Pereira,
Thiago de Jesus de Souza & Wellington Lorrán Gaia Ferreira



(a) Acelerações observadas nas proximidades do buraco 1



(b) Acelerações observadas nas proximidades do buraco 2

Figura 5 - Acelerações nos eixos X e Y próximas do B1 e do B2



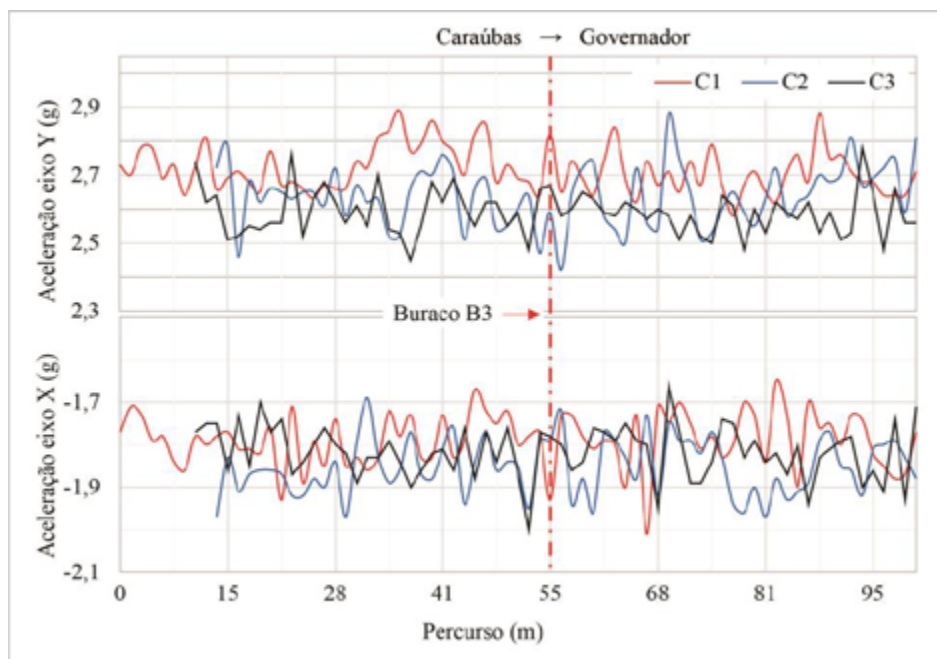
DOI: 10.29327/1430212.49-86

INVESTIGAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A PRESENÇA DE BURACOS E O PADRÃO DE CONDUÇÃO VEICULAR

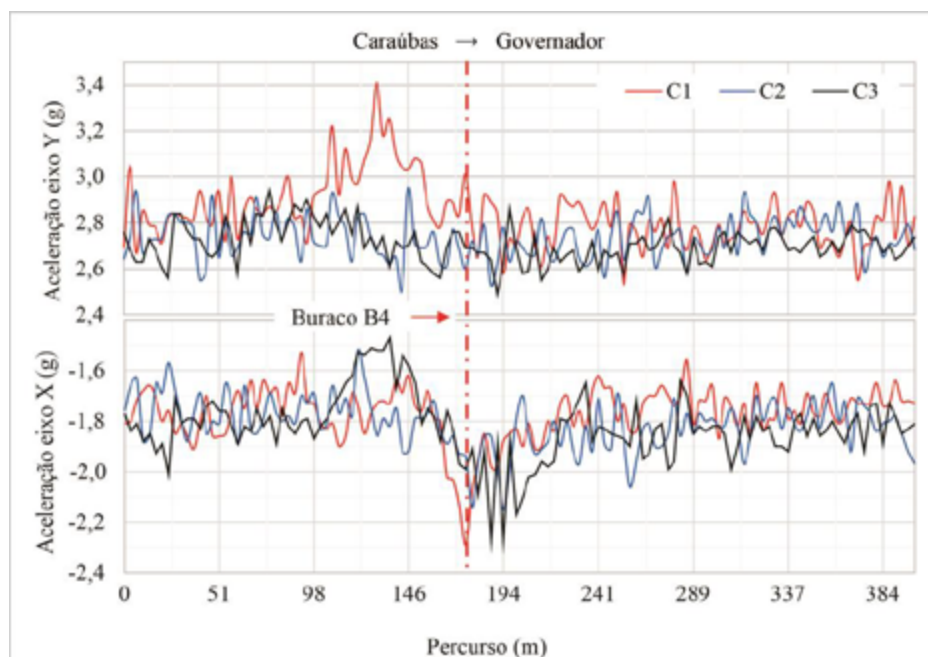
Analisando a Figura 5a, verifica-se que a aceleração no eixo X manteve-se similar ao longo do percurso para os três condutores. No entanto, para a aceleração no eixo Y observa-se que dois dos condutores (C1 e C2) iniciaram algum movimento no sentido transversal da via cerca de 50 m antes do B1, possivelmente tentando desviar do buraco. Já para o condutor 3 (C3), não foi observado nenhuma tendência de movimento quando na presença do B1. O C3 pode ter passado por cima do buraco. O fato do C3 ter realizado um movimento no eixo X, cerca de 30 m após o B1, pode indicar que houve alguma situação inesperada (passar por cima do buraco) e o condutor realizou uma desaceleração. Por outro lado, analisando a Figura 5b, verifica-se que para o B2 não foi observado nenhum padrão de comportamento distinto entre os três condutores tanto no eixo X quanto no eixo Y, indicando que esse buraco não afetou o padrão de condução. Essa diferença de comportamento frente aos buracos pode estar atrelada ao tamanho dos mesmos. O B1 é um buraco com dimensões maiores e com maior profundidade se comparado ao B2, como indicado na Tabela 1. Essa diferença de tamanho pode ter influenciado no padrão dos condutores.

3.2. Influência da Posição do Buraco no Padrão de Condução Veicular

A Figura 6 apresenta os resultados de aceleração no eixo X (longitudinal à pista) e no eixo Y (transversal à pista) confrontando os dados do buraco 3 (B3) com o buraco 4 (B4).



(a) Acelerações observadas nas proximidades do buraco 3



(b) Acelerações observadas nas proximidades do buraco 4
 Figura 6 - Acelerações nos eixos X e Y próximas do B3 e do B4

Analisando a Figura 6, verifica-se que para a aceleração no eixo Y (transversal à pista), nenhuma tendência de alteração foi observada para nenhum dos condutores tanto para o B3 quanto para o B4, indicando que não houve movimentação transversal. Com relação ao eixo X, percebe-se uma ligeira desaceleração antes do B4. A posição dos buracos B3 e B4 são similares na via, localizados no centro da faixa de rolamento sendo possível que os veículos ultrapassem se mantendo dentro da faixa de rolamento. Porém, o B4 apresenta maiores dimensões, além de ser mais profundo e com menor espaço entre os limites do buraco e a borda externa da via, como apresentado na Tabela 1. Essa condição do B4 não foi suficiente para modificar o comportamento na transversal dos condutores, porém, houve uma desaceleração longitudinal como sinal de alerta.

3.3. Influência do Buraco na Trajetória do Veículo

Além da avaliação das acelerações nos eixos longitudinal e transversal, a trajetória dos condutores foi investigada (Figuras 7, 8, 9 e 10). Na Figura 7, são mostradas as trajetórias dos condutores C1, C2 e C3 para o buraco 1 (B1).



DOI: 10.29327/1430212.49-86

INVESTIGAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A PRESENÇA DE BURACOS E
O PADRÃO DE CONDUÇÃO VEICULAR

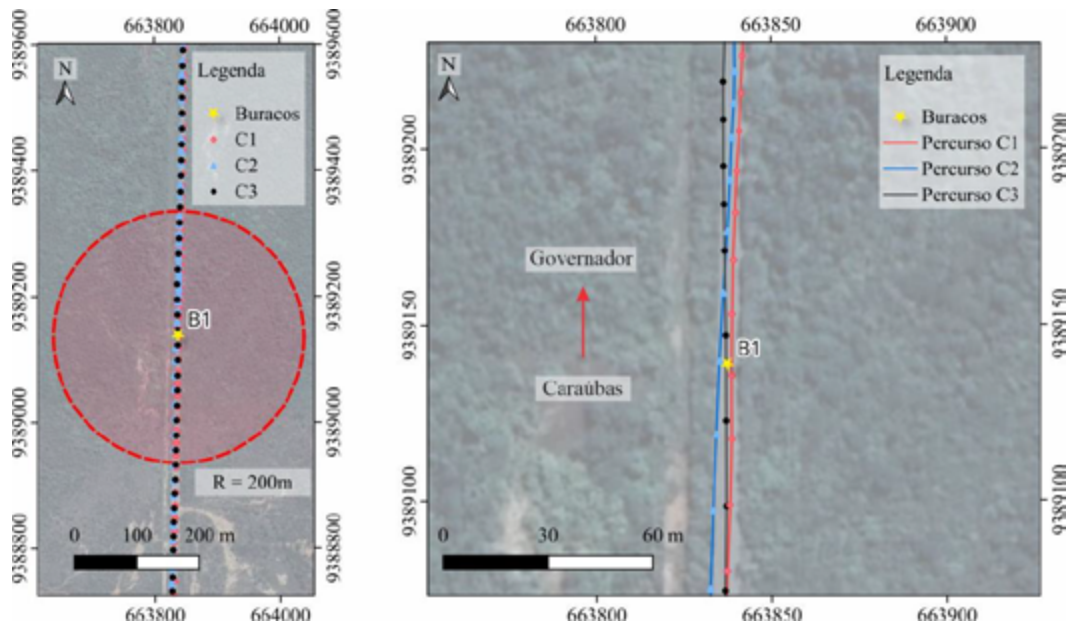


Figura 7 - Percurso dos condutores para o buraco B1

Na Figura 7, observa-se os percursos impostos pelos condutores (C1, C2 e C3) ao passar pelo buraco B1. Verifica-se que a trajetória do C3 se manteve aparentemente retilínea ao longo do trecho, enquanto os condutores C1 e C2 possivelmente tenham realizado algum tipo de manobra. Aparentemente, todos os condutores desaceleraram após passar B1. Esta análise corrobora com as informações mostradas na Figura 5, a taxa de desaceleração pode ter sido maior para o condutor C3, conforme verificado na aceleração do eixo X. Na Figura 8 e Figura 9, são mostrados os mapas dos percursos para os buracos B2 e B3, respectivamente.

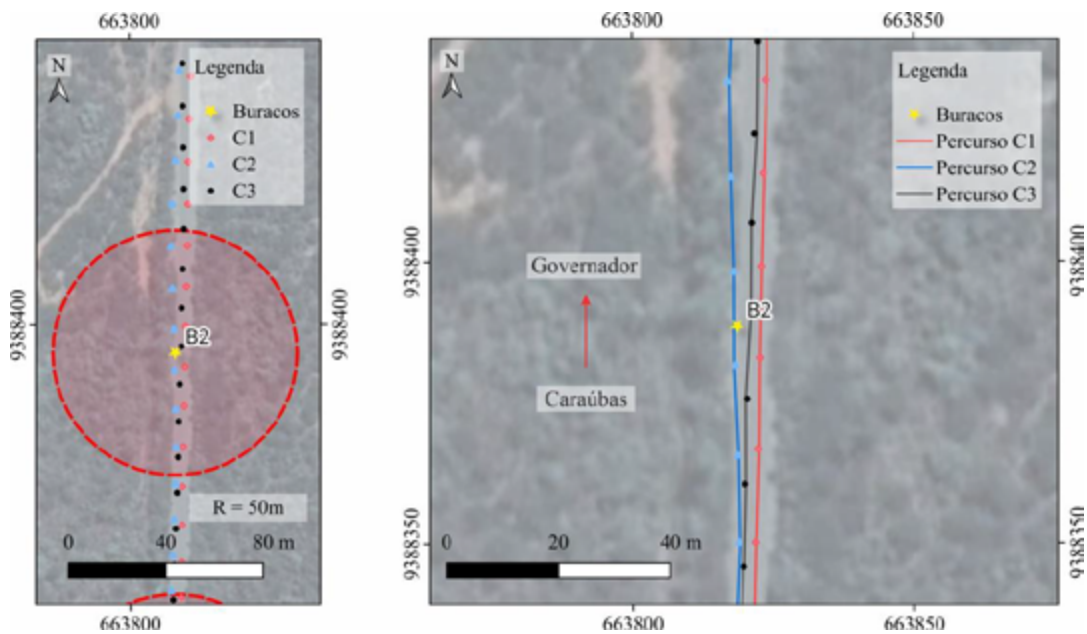


Figura 8 - Percurso dos condutores para o buraco B2

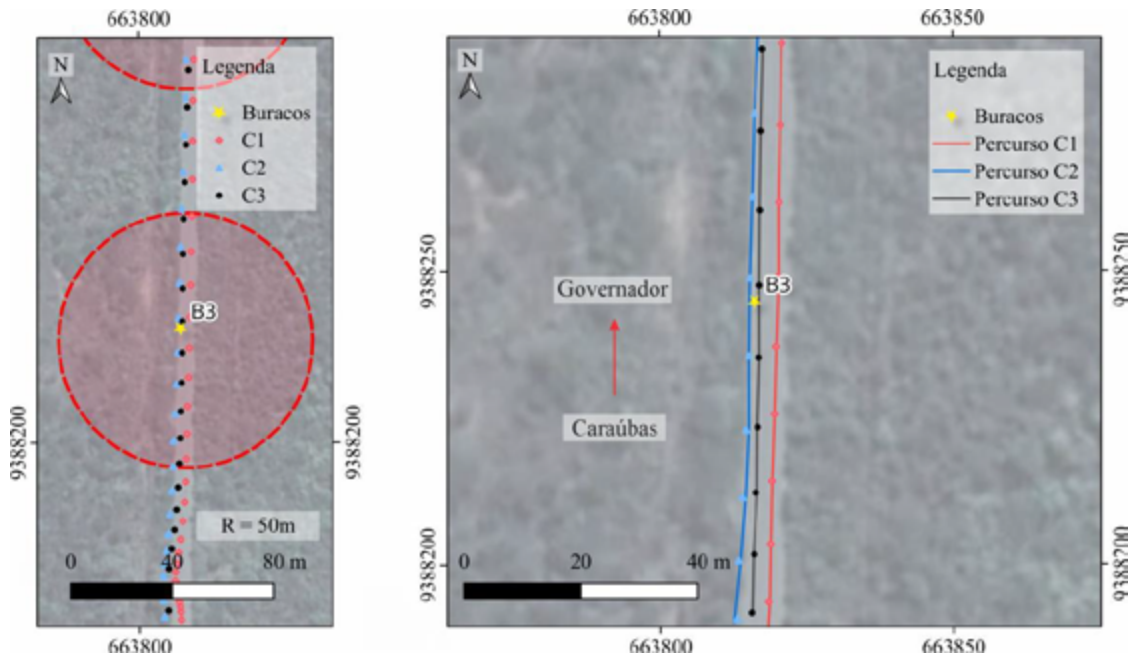


Figura 9 - Percurso dos condutores para o buraco B3

De acordo com os mapas mostrados nas figuras 8 e 9, verifica-se os percursos mantiveram-se lineares, sem muita variação no sentido longitudinal. Porém, para o eixo transversal, houve uma leve variação do condutor C2 para o B2, fato que pode estar relacionado com a variação transversal a 30 m do B2, mostrada na Figura 5. Na Figura 10, são mostrados os percursos dos condutores para o B4.

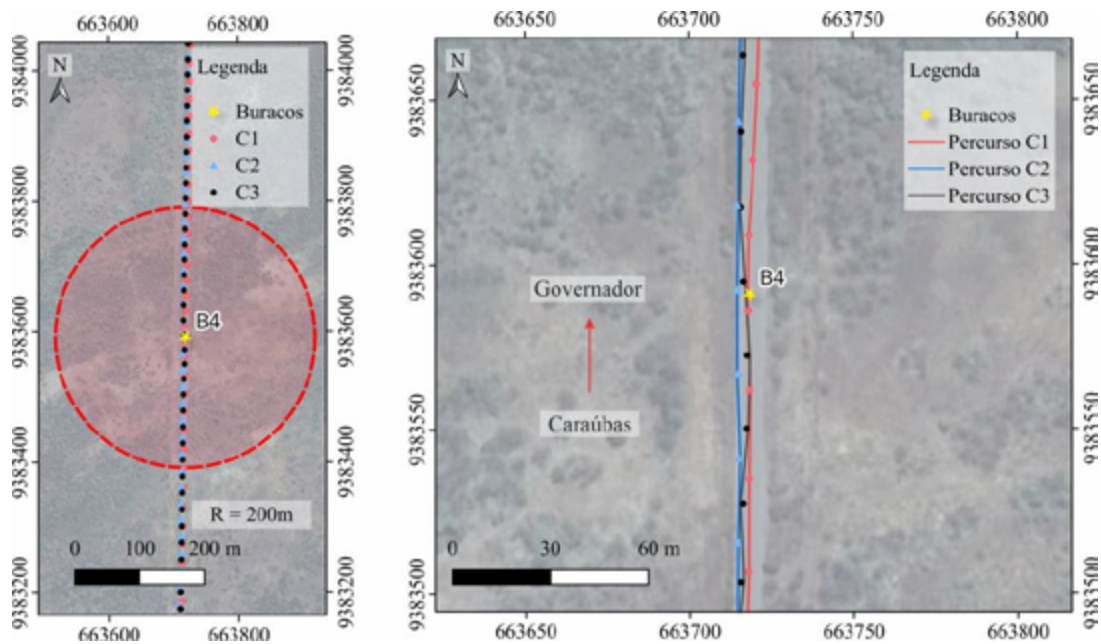


Figura 10 - Percurso dos condutores para o buraco B4



DOI: [10.29327/1430212.49-86](https://doi.org/10.29327/1430212.49-86)

INVESTIGAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A PRESENÇA DE BURACOS E O PADRÃO DE CONDUÇÃO VEICULAR

Analisando o mapa mostrado na Figura 10, observa-se que houve uma pequena variação longitudinal dos condutores, possivelmente devido ao sinal de alerta relacionado ao B4. O condutor C3 aparentemente realizou uma pequena variação lateral. Porém, possivelmente foi de forma leve, em longa distância no eixo longitudinal. As análises dos percursos mostrados nos mapas (figuras 7, 8, 9 e 10) corroboram com as observações mostradas nos gráficos (figuras 5 e 6), resultantes da aceleração nos eixos longitudinal e transversal, para os três condutores do estudo.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo investigar se a presença de buracos nas rodovias afeta a condução veicular. Verificou-se que as características dos buracos, isto é, as dimensões e a posição dos mesmos na via podem influenciar o comportamento dos motoristas. Buracos de tamanho maior que cobrem parte da faixa de rolamento provocam movimentação lateral dos veículos. No caso em estudo trata-se de uma via de mão dupla, sem acostamento, com buracos localizados em um tangente, isto é, em um trecho com possibilidade de ultrapassagem entre veículos, e qualquer movimento transversal abrupto gerado pela presença de buracos pode ser perigoso a depender da dinâmica do tráfego no local. Ademais, se o buraco estiver mais próximo da borda da via, com estreito espaço para o pneu do veículo passar, o motorista tende a desacelerar longitudinalmente buscando maior segurança. Portanto, são pontos que devem servir de alerta tanto para os motoristas quanto para os gestores do trecho responsáveis pelos serviços de manutenção. Por fim, em trabalhos futuros, espera-se aumentar a quantidade de dados coletados (maior quantidade de buracos e de condutores), a fim mapear outros cenários e consolidar as tendências observadas nesse estudo, de forma a contribuir com redução da ocorrência de sinistros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARMAN, M. A.; TAMPÈRE, C. M. J. Lane-level trajectory reconstruction based on data-fusion. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 145, p. 103906, 2022.
- CHOU DHARI, T.; MAJI, A. Socio-demographic and experience factors affecting drivers' runoff risk along horizontal curves of two-lane rural highway. *Journal of Safety Research*, v. 71, p. 1–11, 2019.
- CNT (2022). Confederação Nacional dos Transportes. Painel CNT de Consultas Dinâmicas dos Sinistros Rodoviários.
- CNT (2023). Confederação Nacional dos Transportes. Guia CNT de Segurança nas Rodovias.
- HE, H.; LI, R.; YANG, Q.; PEI, J.; GUO, F. Analysis of the Tire-Pavement Contact Stress Characteristics during Vehicle Maneuvering. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 25, n. 7, p. 2451–2463, 12 jul. 2021.
- KUMAR, A.; GUPTA, A. Review of Factors Controlling Skid Resistance at Tire-Pavement Interface. *Advances in Civil Engineering*, v. 2021, p. 1–16, 2021.
- LAROCCA, A. P. C.; Ribeiro, R. L.; Figueira, A. C.; De Oliveira, P. T. S.; Lulio, L. C.; Rangel, M. A. C. (2018) Analysis of perception of vertical signaling of highways by drivers in a simulated driving environment. *Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour*, v. 58, p. 471-487.
- MAIA, R. S. Contributions to the tire-pavement friction characterization from the traffic safety perspective. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.



MAZZEI, M.; LELLIS, A. M. DI. Capacitive accelerometers at low frequency for infrastructure monitoring. *Procedia Structural Integrity*. Anais. Elsevier B.V., 2022.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (2021). Plano global década de ação pela segurança no trânsito 2021-2030. Geneva, Switzerland.

RIBEIRO, P. J. G.; Araujo, C. M. C.; Goncalves, L. A. P. J.; Dias, G. J. C.; Cunto, F. J. C. (2019) Micro-simulation of the impact of different speeds on safety road travel and urban travel time: case study in the city of Guimarães. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, v. 15, p. 297-310.

RODRIGUES, J.G., Paiva, R.M.S., Ferreira, W.L.G. (2022) Avaliação da Macrotextura de Pavimentos Asfálticos em vias Urbanas e a Relação com a Segurança Viária. 24º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), Bento Gonçalves, RS.

UUS, A.; MIAH, S.; ROBERTS DIRECTOR, S.; TWIST GEOPHYSICIST, S.; HOVENS, M.; NARDONI, G. NDT Sensor Fusion: Optimisation of NDT Sensor Data Processing Strategies for Road Infrastructure Inspection. 2016.



INTRODUÇÃO À INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA DETECÇÃO E MAPEAMENTO DE SINALIZAÇÃO VIÁRIA

Leticia Barros¹; Carlos Ivan²; Thiago Dantas³; Mariana Prysthon⁴

RESUMO

A sinalização desempenha um papel fundamental na garantia da segurança viária e na eficiência do sistema de transporte. É essencial que esteja em conformidade com as normas e manuais estabelecidos para garantir sua eficácia. O estudo destacou que problemas relacionados a sinalização vertical podem resultar em acidentes de trânsito. Para cadastros de sinalização existente são realizados levantamentos tradicionais (manuais), que demandam tempo e possui uma menor precisão. A fim de realizar uma detecção rápida e precisa, o modelo de IA baseado na arquitetura YOLO v8, treinado para identificar placas de sinalização. O estudo foi realizado em um trecho específico em Recife, Pernambuco, onde foram coletados dados de campo e aplicado o modelo desenvolvido. Os resultados mostraram uma acurácia satisfatória de 91% na detecção de placas de sinalização. No entanto, há desafios a serem superados, como melhorar o desempenho em condições adversas, especialmente em trechos urbanos. O uso da IA proporcionou uma coleta de dados mais eficiente e automatizada, com potencial para auxiliar na manutenção e monitoramento contínuo da sinalização viária, contribuindo para a segurança viária e a redução de acidentes. Este estudo destaca o potencial da IA como uma ferramenta poderosa para melhorar a gestão da infraestrutura viária e garantir a segurança dos usuários das vias.

PALAVRAS-CHAVE: infraestrutura de transporte; rodovia; sinalização viária; inteligência artificial.

ABSTRACT

Traffic signs plays a fundamental role in ensuring road safety and the efficiency of the transportation system. It is essential that it complies with established regulations and manuals to ensure its effectiveness. The study highlighted that issues related to vertical traffic signs can lead to traffic accidents. Traditional (manual) surveys are conducted for existing traffic signs registries, which are time-consuming and less accurate. In order to achieve fast and precise detection, the YOLO v8 architecture-based AI model, trained to identify traffic signs plates. The study was conducted in a specific road segment in Recife, Pernambuco, where field data was collected and the developed model was applied. The results showed a satisfactory accuracy of 91% in detecting traffic signs plates. However, there are challenges to be overcome, such as improving performance in adverse conditions, especially in urban areas. The use of AI provided a more efficient and automated data collection process, with the potential to assist in the maintenance and continuous monitoring of road traffic signs, contributing to road safety and accident reduction. This study highlights the potential of AI as a powerful tool to improve road infrastructure management and ensure the safety of road users.

KEY WORDS: transport infrastructure; highway; road signs; artificial intelligence.

¹ TPF Engenharia, leticia.pessoa@tpfe.com.br; carlos.ivan@tpfe.com.br; thiago.dantas@tpfe.com.br; mariana.moraes@tpfe.com.br



INTRODUÇÃO

Segundo o Manual de Sinalização Rodoviária do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT (BRASIL, 2010), o aumento significativo da frota de veículos, aliado a outros fatores, como o fato de não haver uma evolução da malha rodoviária do país compatível com a demanda de veículos e o fluxo, fez com que a sinalização se tornasse cada vez mais relevante para a segurança viária.

O Ministério de Transporte (BRASIL, 2022), define segurança viária como o conjunto de métodos, ações e normas existentes necessários para a circulação segura de pessoas e veículos nas ruas e rodovias, com a finalidade de prevenir e reduzir o risco de acidentes.

Segundo Fontana (2005), a sinalização de trânsito é um dos mais importantes elementos da infraestrutura viária, pois é através dela acontece a comunicação entre a via e os usuários. Sendo assim, entende-se que um sistema de sinalização coerente é fundamental para a segurança viária e o desenvolvimento de um sistema de transportes mais eficiente. Para garantir a segurança viária faz-se necessário que as sinalizações e dispositivos de segurança estejam em conformidade com as normas vigentes. No tocante a sinalização vertical, o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito Volume I, III, III e IV (CONTRAN, 2022), elenca os seguintes princípios: legalidade, suficiência, padronização, clareza, precisão, confiabilidade, visibilidade, legibilidade, manutenção e conservação de modo assegurar a eficácia dos sinais.

A ocorrência de acidentes de trânsito está diretamente associada também a uma sinalização deficiente. No âmbito de sinalização vertical, Ferraz *et al.* (2012), elencam como principais problemas associados a sinalização a falta e/ou excesso de sinais, mal posicionamento prejudicando a visibilidade, sinais sem retrorefletância adequada e com visibilidade prejudicada por falta de manutenção e etc. Segundo os estudos de Ferraz *et al.* (2012), a correção da sinalização vertical incorreta deve causar as seguintes alterações nos números de acidentes:

- acidentes com vítimas = -25% a -3% (melhor estimativa = -15%);
- acidentes sem vítimas = -14% a 0% (melhor estimativa = -7%).

Neste contexto surgiram ferramentas para detecção de sinalização vertical. O método tradicional utilizado no levantamento/cadastro é o topográfico, contudo, é um processo manual e demorado, realizado por uma equipe de campo ao longo do trecho determinado. Nos últimos anos surgiram ferramentas computacionais que vêm sendo aplicadas, cada vez mais, ao levantamento, otimizando-o e conseqüentemente, diminuindo o tempo de coleta. Segundo Rodrigo Aguiar (2024), no artigo “Desafios e Oportunidades na Análise de Dados para segurança Viária”, a inteligência artificial pode lidar com uma quantidade maior e mais complexa de dados, permitindo identificar padrões sutis e não lineares que podem passar despercebidos em análises estatísticas tradicionais.

O presente trabalho buscou estudar a aplicação da inteligência artificial (IA) para detecção e reconhecimento de sinalização viária. O cenário avaliado foi de que, ao utilizar inovações tecnológicas atreladas a infraestrutura viária, em especial a sinalização vertical, pode-se obter um



DOI: 10.29327/1304307.48-1

INTRODUÇÃO À INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA DETECÇÃO E MAPEAMENTO DE SINALIZAÇÃO VIÁRIA

método eficiente para cadastro da sinalização existente, com a localização geográfica, auxiliando no monitoramento e manutenção, de modo a garantir mobilidade, segurança e qualidade ao usuário.

METODOLOGIA

Área de estudo

O trecho escolhido para o experimento compreendeu a extensão da Rua Capitão Rebelinho até a Rua Amazonas, no bairro de Boa Viagem, na cidade do Recife, em Pernambuco, Brasil; o que representa aproximadamente 1 km de extensão. Este trecho é caracterizado como via urbana tipo via coletora, que conforme o Anexo – I do Código de Trânsito Brasileiro (BRASIL, 1997) é uma via destinada a coletar e distribuir o trânsito que tenha necessidade de entrar ou sair das vias de trânsito rápido ou arterial.

Figura 1. Localização da Rua Capitão Rebelinho ao final da Rua Amazonas em Recife/PE
(Elaborada pelo AUTOR, 2024).



Etapas do processo

Para a execução da IA foram definidas três etapas para o processo de detecção de objeto sendo:

- desenvolvimento do sistema de inteligência artificial;



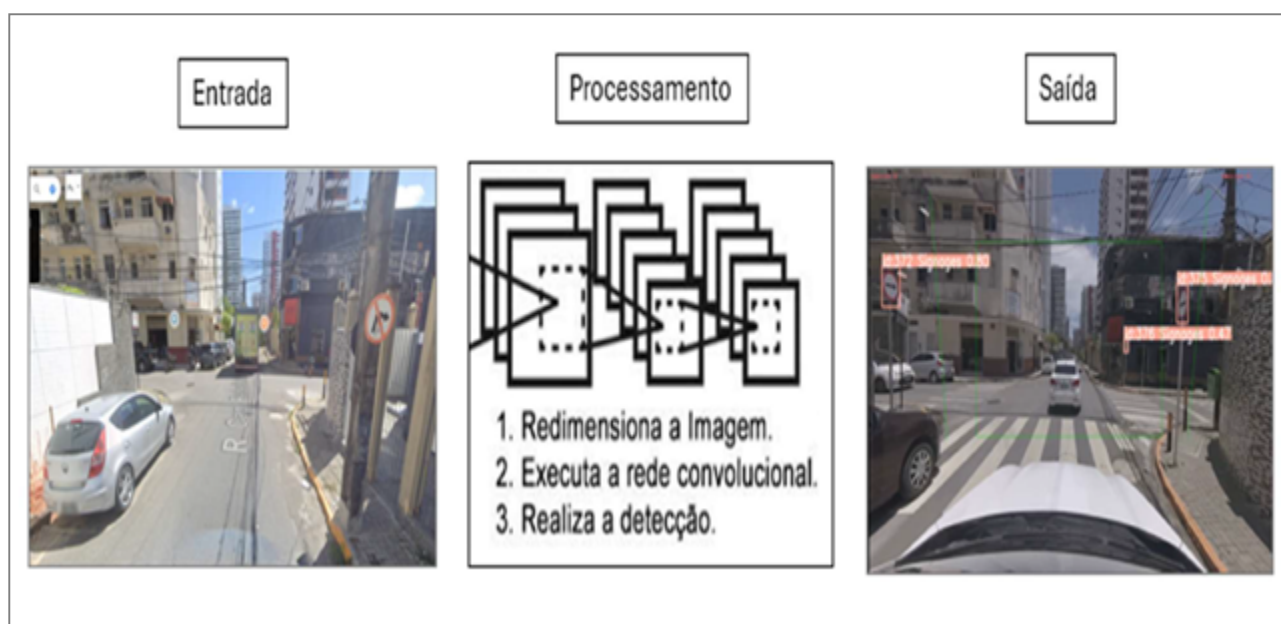
- planejamento e Treinamento;
- aplicação do modelo

O atendimento a cada atividade é crucial para a eficácia da metodologia estudada, uma vez que proporciona à equipe maior eficiência e sequencialidade. O fluxo previamente estabelecido torna os pontos de melhorias mais fáceis de detectar, e por fim, assegura a qualidade do resultado.

Desenvolvimento do sistema de inteligência artificial

Desenvolveu-se um modelo personalizado de visão computacional que utiliza da arquitetura do *You Only Look Once (YOLO) v8*, que é uma Rede Neural *Convolutiva (CNN)*, para a identificação de placas de sinalização em cenários de rodovias urbanas e rurais. O Modelo funciona na sequência a seguir: a imagem de entrada é redimensionada, submetida à YOLO e, em seguida, a detecção é realizada, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Sistema de detecção do YOLO (AUTOR, adaptado google maps, 2024).



No âmbito da visão computacional, o treinamento do modelo de visão computacional envolve várias etapas das etapas, sendo elas: levantamento do conjunto de dados, preparação e rotulagem, treinamento do modelo e por fim, validação. A primeira etapa desse processo é o levantamento que constitui-se na obtenção de dados de rodovias que foram levantadas anteriormente sem o uso da IA. Com os dados adquiridos, segue-se a fase de preparação e rotulagem. Durante esta etapa, realizou-se o processamento dos dados coletados, direcionando a aprendizagem do modelo de IA para a identificação placas de sinalização



DOI: [10.29327/1304307.48-1](https://doi.org/10.29327/1304307.48-1)

INTRODUÇÃO À INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA DETECÇÃO E MAPEAMENTO DE SINALIZAÇÃO VIÁRIA

O desenvolvimento do modelo foi dividido em três conjuntos principais: treinamento, validação e teste, com as seguintes proporções específicas, 70%, 20% e 10%. A divisão foi fundamental para garantir a robustez do modelo, fornecendo uma estrutura sólida para aplicação.

Planejamento e Treinamento

Na etapa de planejamento é realizada a definição dos parâmetros relevantes para o levantamento, tais como: início e fim da via, ativos (placas.), definição de equipe e data da coleta de campo. É necessário realizar, durante o planejamento, o treinamento da equipe para execução; neste momento será apresentado como manipular os equipamentos a serem utilizados e alinhados pontos relativos à instrumentação e velocidade do veículo, dentre outros parâmetros necessários para a aplicação. Cabe ressaltar que, alguns fatores influenciam a diretamente a coleta, tais como: condições climáticas, horário (manhã ou tarde), tempo da bateria da câmera, entre outros.

Após o treinamento, realizaram-se visitas ao trecho escolhido com objetivo de coletar dados para aplicação do modelo apresentado no presente trabalho.

Aplicação do modelo

Inicialmente realiza-se vídeos e imagens ao longo do trecho definido e em seguida aplica-se a execução do modelo. Sendo assim, o levantamento em campo divide-se na seguinte forma: instrumentação do veículo, coleta, aplicação do modelo e entregáveis. Na instrumentação do veículo realizou-se o posicionamento e fixação da câmera e GPS a serem utilizados na fase de coleta de novos dados.

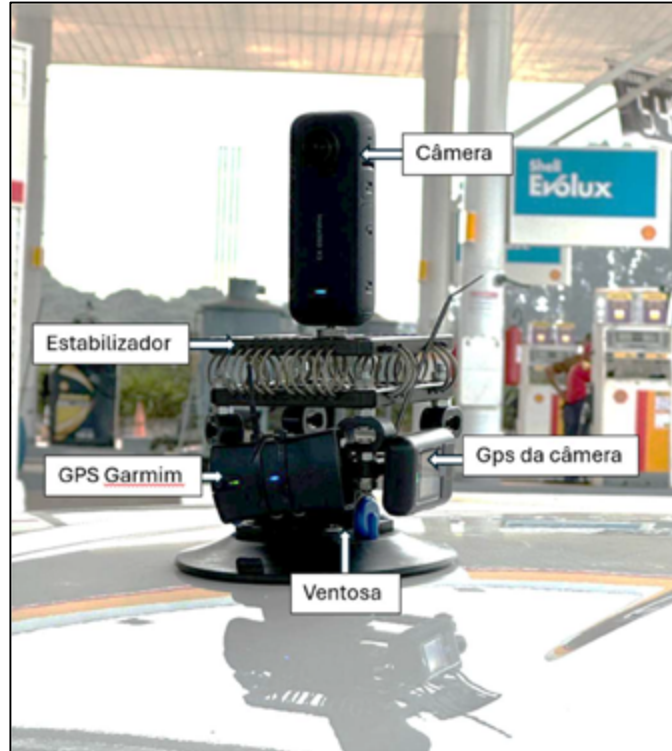
Para obtenção da mídia (imagens ou vídeos) em campo, utilizou-se a câmera Insta360 – X3, posicionada no topo do veículo a uma altura aproximada de 1,60m e ajustada para o enquadramento desejado. Esta câmera oferece capacidade para registrar imagens em 360° com resolução de até 4K. No entanto, para este estudo, optou-se por utilizar apenas a função de gravação frontal, mantendo a resolução de 4K. Para o correto funcionamento a deve-se limitar a velocidade máxima do veículo a 80 km/h. Para levantamentos de grandes trechos, recomenda-se levar mais baterias a campo, pois a durabilidade média da bateria é de uma hora e meia a duas horas.

Quanto ao sistema de georreferenciamento, inicialmente utilizou-se o acessório 'GPS Action Remote' da Insta360° X3, que se conecta via Bluetooth 5.0 e fornece dados de localização e marcação temporal. No entanto, durante os testes, observou-se uma precisão abaixo do esperado, especialmente em áreas urbanas. Para melhorar a precisão, incorporou-se um dispositivo GPS da Garmin, trabalhando em conjunto com o equipamento da Insta360° X3 e instalado externamente ao veículo, devido à interferência dentro dele. A bateria do Gps possui uma longa duração, conseguindo atender o levantamento de um dia de campo.

Na figura 3, destacam-se os equipamentos utilizados para realizar o levantamento, dentre eles a Câmera Insta360° X3, GPS Action Remote e o Garmim, suporte de ventosa tripla, estabilizador, além de cartões de memória, bateria e o tablet dentro do veículo instalado com alguns aplicativos que irão armazenar dados para o armazenar dados para subsidiar o desenvolvimento do entregável em kml.

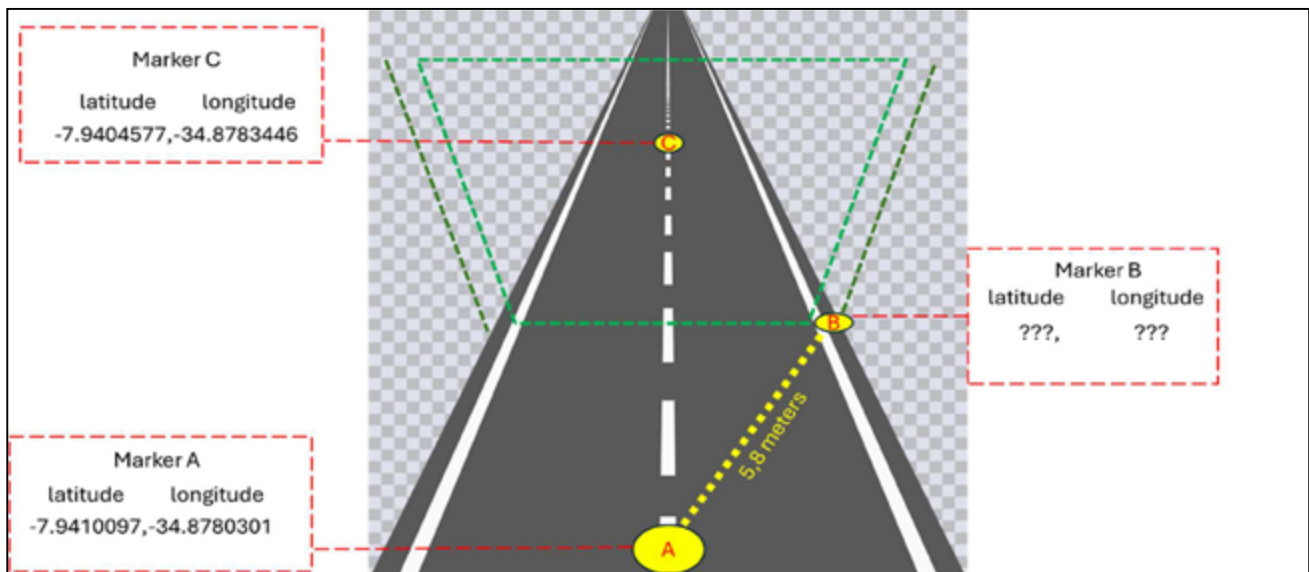


Figura 3. Instrumentação do veículo (AUTOR, 2024).



Para a determinação das coordenadas aplicou-se a trigonometria a partir do método de irradiação topográfica, também conhecida como polar. Na prática, o ponto do veículo (A) visualizará o ponto posterior, que é o trecho que o carro vai seguir (C) e o ponto que queremos descobrir (B), conforme ilustrado na Figura 4 apresentada a seguir.

Figura 4. Aplicação da trigonometria (AUTOR, 2024).





DOI: [10.29327/1304307.48-1](https://doi.org/10.29327/1304307.48-1)

INTRODUÇÃO À INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA DETECÇÃO E MAPEAMENTO DE SINALIZAÇÃO VIÁRIA

Por fim, os dados entregues são:

- Relatório fotográfico em formato XML contemplando informações como: ID, tipo, distância, latitude, longitude, tempo de vídeo, foto da placa, entre outros;
- arquivo em KML com a identificação do ativo (placas).

RESULTADOS

Após ter realizado o processo de aprendizagem do modelo, a fim de obter a alta acurácia no processamento dos vídeos e identificação dos ativos, obteve-se um resultado satisfatório, com uma acurácia de 91%, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos. As imagens rotuladas foram utilizadas para alimentar o modelo de visão computacional, direcionando seu aprendizado para obter alta precisão na identificação das placas.

Os entregáveis da metodologia aplicada permitem diferentes formas de análise e integração dos resultados. Na figura 5 apresenta-se o resultado da imagem capturada e analisada pela IA treinada para identificar objetos. Os resultados da análise da inteligência artificial em KML foram apresentados através da identificação das placas o relatório em XLM, que contém mais dados e imagens das placas, conforme respectivamente exemplificado na Figura 6 e 7.

Figura 5. Detecção de Placas (AUTOR, 2024).





Figura 6. Entregáveis em KML (AUTOR, 2024).

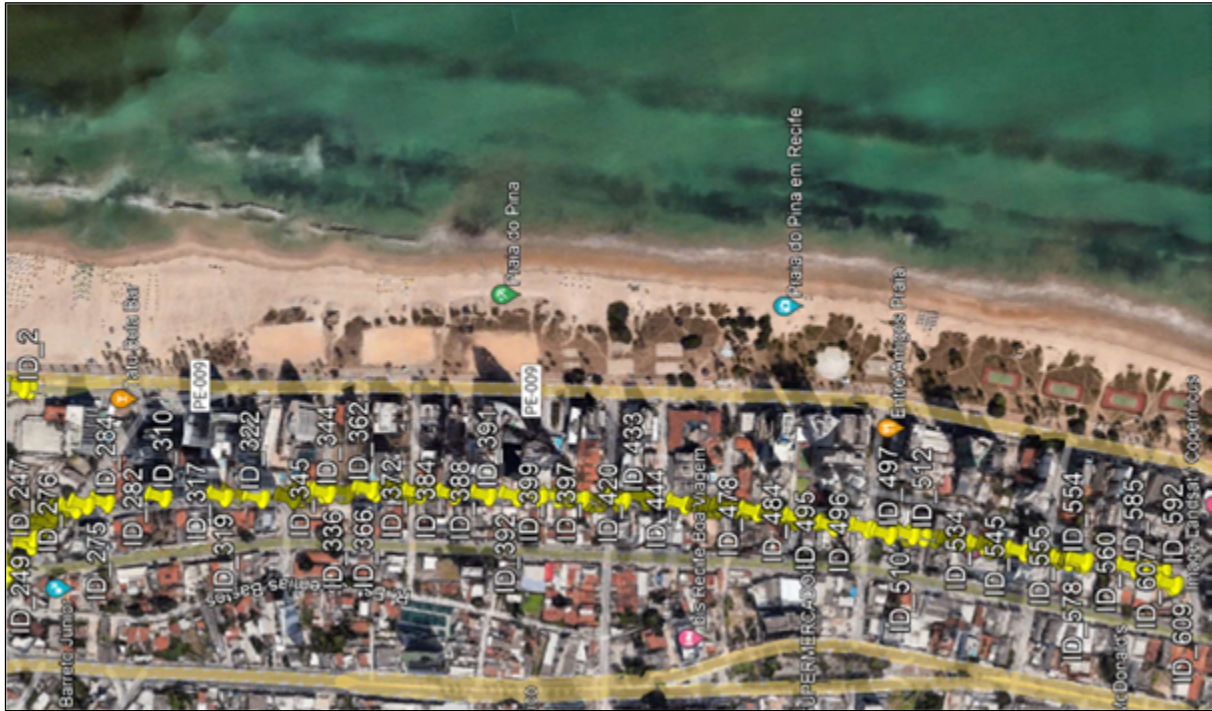


Figura 7. Entregáveis em relatório XML (AUTOR, 2024).

VERTICAL SIGNAGE EVALUATION REPORT									
ID	TYPE	DISTANCE	SIDE	VEHICLE LATITUDE	VEHICLE LONGITUDE	VIDEO TIME	ASSET LATITUDE	ASSET LONGITUDE	PHOTOGRAPHIC RECORD
4	Signages	8.06 metros	Left	-8,08993179	-34,88243804	00:00:53	-8,089893615	-34,88250033	
1	Signages	8.06 metros	Left	-8,08984034	-34,88251874	00:00:54	-8,089803125	-34,88258161	
5	Signages	8.06 metros	Right	-8,08957956	-34,88277239	00:00:57	-8,089517976	-34,88281149	



DOI: [10.29327/1304307.48-1](https://doi.org/10.29327/1304307.48-1)

INTRODUÇÃO À INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA DETECÇÃO E MAPEAMENTO DE SINALIZAÇÃO VIÁRIA

CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a aplicação da inteligência artificial na detecção de sinalização vertical representa um avanço significativo para a gestão da infraestrutura viária. A partir de algoritmos de visão computacional, foi possível inovar e automatizar o processo de identificação e classificação dos objetos, consequentemente, obteve-se uma maior precisão e rapidez na coleta de campo.

Constatou-se que o mapeamento realizado pela IA além de ter maior agilidade e automação na captura, identificação e classificação, é uma inovação na gestão de ativos de rodovia pois auxilia no monitoramento contínuo da sinalização viária existentes, pois os dados podem ser enviados diariamente, subsidiando tomadas de decisões, como a implementação de medidas preventivas e adequações necessárias de modo a assegurar a segurança viária, impactando positivamente na redução do número de acidentes. A tecnologia tem potencial para ser utilizada em grande escala, por possuir um baixo custo, simplicidade operacional e alta produtividade.

Durante o desenvolvimento da pesquisa observou-se que o levantamento em trechos urbanos apresentou bastante obstáculos que dificultam a leitura dos objetos, tais como, árvores, veículos, poluição visual e etc. Uma solução para superar tal desafio, seria treinar o modelo com dados diversificados e em diferentes condições para que consiga mesmo em situações adversas, realizar uma detecção precisa e confiável. Cabe ressaltar que, em trechos rurais, os desafios são outros, danificação das placas, obstrução por vegetação/sujeira, geometria (curvas acentuadas), estes podem dificultar também a visualização.

Por fim, uma sugestão para pesquisas futuras é avaliar a aplicação da inteligência artificial na detecção de outros elementos, tais como: dispositivos de segurança (defensas, barreiras e terminais), drenagem (sarjeta, alas de bueiros, caixas e descida d'água), complementares (árvores, calçadas e etc), OAE (pontes, passarelas e viadutos) entre outros.

AGRADECIMENTOS

Os presentes autores agradecem à TPF Engenharia LTDA por todo incentivo e pelo fornecimento de dados e materiais para desenvolvimento desta pesquisa, desta forma, elevando o nível técnico de seus colaboradores e da engenharia do país.

REFERÊNCIAS

AGUIAR DOS SANTOS, Rodrigo. **Desafios e Oportunidades na Análise de dados para Segurança Viária**. Onsv, 2024. Disponível em: <<https://www.onsv.org.br/comunicacao/observadores-certificados/desafios-e-oportunidades-na-analise-de-dados-para-seguranca-viaria>> Acesso em: 08 abr. 2024

BRASIL, Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Manual de Conservação Rodoviária**. 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

BRASIL, Ministério dos Transportes. **Segurança viária**, 2022. Disponível em:< <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/rodovias-federais/seguranca-viaria>> Acesso em: 27 de abril de 2024.



BRASIL. Lei Nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. **Institui o código de trânsito brasileiro.** Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503compilado.htm> Acesso em: 27 de abril de 2024.

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito. **Sinalização Vertical de Advertência.** 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/docs/copy_of__02__MBST_Vol._II__Sin._Vert._Advertencia.pdf> Acesso em: 17 abr. 2024.

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito. **Sinalização Vertical de Indicação.** 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/docs/copy_of__03__MBST_Vol._III__Sin._Vert._Indicacao> Acesso em: 17 abr. 2024.

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito. **Sinalização Vertical de Regulamentação.** 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/docs/copy_of__01__MBST_Vol._I__Sin._Vert._Regulamentacao_F.pdf> Acesso em: 17 abr. 2024.

FERRAZ, Antonio Clóvis Pinto “Coca” *et al.* **Segurança Viária.** Ed: Suprema Gráfica e Editora. São Paulo, 2012.

FONTANA, A. M. **Estudo psicofísico sobre conspicuidade, estética e harmonia ambiental de sinais de trânsito.** Tese de doutorado, EESC/USP, 2005.



Um estudo de caso sobre sinistros de trânsito na rodovia BR-277/PR e as ações previstas nos programas de concessão rodoviária para melhoria da segurança viária

Patrícia Pacheco Bertozzi¹

RESUMO

Este estudo de caso faz uma análise descritiva de dados registrados pela Polícia Rodoviária Federal (PRF) de sinistros de trânsito na BR-277 no estado do Paraná, entre os municípios de Balsa Nova e Curitiba, para o período entre 2018 e 2023. A primeira etapa consistiu na conceituação da temática de sinistro de trânsito e na identificação dos documentos referenciais para definir políticas, programas, ações e metas para redução de sinistros com vítima fatal e incidentes de trânsito. Já na segunda etapa, foi identificado, segmentado e analisado os sinistros de trânsito registrados pela PRF para o período citado. Quanto à terceira etapa, foi consultado para o período entre 2018 e 2021, quais as ações de acompanhamento de sinistros e incidentes de trânsito e melhorias de segurança viária foram tomadas pela antiga concessionária do Lote 05 do Programa de Concessão Rodoviária do estado do Paraná, cujo contrato se encerrou em novembro de 2021, complementada por uma análise de condições de infraestrutura de pavimento e sinalização rodoviária no ano do encerramento contratual. A quarta etapa identificou no estudo de viabilidade do Lote 01 do novo programa de concessão rodoviária da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), quais foram as análises e medidas sugeridas para melhoria da segurança rodoviária previstas para os próximos 30 anos no trecho em estudo. Para finalizar, foi realizada a comparação de sinistros de trânsito entre 2018 e 2023 e as medidas previstas para o novo lote de concessão rodoviária que engloba o referido trecho da BR-277/PR.

PALAVRAS-CHAVE: Sinistro de trânsito; Segurança rodoviária; Concessão rodoviária; *iRAP*.

ABSTRACT

This case study conducts a descriptive analysis of data recorded by the Federal Highway Police (PRF) on traffic accidents on BR-277 in the state of Paraná, between the municipalities of Balsa Nova and Curitiba, for the period between 2018 and 2023. The first stage consisted of conceptualizing the theme of traffic accidents and identifying reference documents to define policies, programs, actions, and goals for reducing accidents with fatal victims and traffic incidents. In the second stage, traffic accidents recorded by the PRF for the mentioned period were identified, segmented, and analyzed. As for the third stage, actions taken to monitor accidents and traffic incidents and improve road safety between 2018 and 2021 were consulted for the former concessionaire of Lot 05 of the Paraná State Road Concession Program, whose contract ended in November 2021, complemented by an analysis of pavement infrastructure and road signage conditions at the same year. The fourth stage identified, in the feasibility study of Lot 01 of the new road concession program of the National Land Transport Agency (ANTT), the analyses and measures suggested for improving road safety over the next 30 years in the studied section. Finally, a comparison of traffic accidents between 2018 and 2023 and the measures planned for the new road concession lot that includes the mentioned stretch of BR-277/PR was conducted.

KEY WORDS: Road traffic crash; Road safety; Highway concession; *iRAP*

¹ Patrícia Pacheco Bertozzi Engenharia EPP, e-mail: patricia.bertozzi@gmail.com



INTRODUÇÃO

O sinistro de trânsito, terminologia adotada pela ABNT NBR 10697:2020 (ABNT, 2020) para substituir o termo acidente de trânsito, vem sendo discutida mundialmente desde a década dos anos 60. A crescente expansão da frota de veículos automotores fez crescer o número de sinistros com vítimas. Segundo dados divulgados pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2009, na média, 1 milhão e 350 mil vidas eram perdidas em sinistros de trânsito anualmente, ou seja, a cada 24 segundos uma pessoa vinha a óbito. Cerca de 90% destes óbitos eram registrados em países de renda baixa e média, com 50% dos óbitos de usuários mais vulneráveis do sistema viário como os pedestres, ciclistas e motociclistas. Para além dos óbitos, outros 50 milhões de pessoas sofreram lesões temporárias ou permanentes a cada ano. As principais causas dos sinistros de trânsito eram relacionadas à ação humana, com o excesso de velocidade a ser a principal causa, seguida da falta de uso de segurança ou cadeira/assento de retenção de criança, falta de uso do capacete e dirigir embriagado (ONU, 2010).

Diante deste quadro, em 2010, a Resolução da Assembleia Geral da ONU 64/255, de 10 de maio de 2010 (ONU, 2010), deliberou sobre a melhoria global da segurança rodoviária e proclamou o período de 2011 -2020 como a “Década de Ação pela Segurança no Trânsito”, com o objetivo de reduzir os sinistros de trânsito em todo o mundo em 50% ao longo de 10 anos. Segundo apurado por Carvalho e Guedes (2023), nesta época, o Brasil figurava na quinta posição de país com mais mortes decorrentes de sinistros de trânsito considerando atropelamentos, sinistros com veículos não motorizados, veículos motorizados e outros tipos de veículos terrestres (veículos de serviço e fora de estrada). Os autores em análise dos dados de mortalidade do Datasus, para o período de 2000 e 2009, apuraram 346.151 mortes e taxa de mortalidade de 18,79 mortes/100 mil habitantes, enquanto no período de 2010 e 2019, houve cerca de 392 mil mortes e taxa de mortalidade de 19,22 mortes/100 mil habitantes. Apesar do Brasil ter desenvolvido políticas públicas e ações para a redução de sinistros, houve aumento de 13,5% de mortes em relação à década passada e a taxa de mortalidade se manteve estável.

Especificamente para os sinistros de trânsito em rodovias federais, entre 2010 e 2019 foram registrados pela Polícia Rodoviária Federal (PRF) 72.745 óbitos, sendo que o estado do Paraná figurava na terceira posição de maior número de óbitos, com 6.688 registros, ficando somente atrás dos estados de Minas Gerais e da Bahia (PRF, 2023). Destes sinistros, a PRF identificou como as principais causas à falta de atenção do condutor/pedestre, desobediência às regras, excesso de velocidade e condução sob o efeito de álcool/drogas (PRF, 2023).

Com o fim dessa primeira década de campanha, a ONU lançou em 2021 o novo ciclo da “Década de Ação pela Segurança no Trânsito”, entre 2021 e 2030, incorporando novas ações que os países devem seguir e estipulando novas metas para 2030.

Apesar da identificação dos sinistros de trânsito estarem relacionados principalmente à ação humana, ele pode ser a resultante de um somatório de fatores em simultâneo, contribuindo cada um deles em maior ou menor grau para sua ocorrência. Pode se destacar o estado da infraestrutura viária, principalmente das condições de pavimento, sinalização e iluminação. Outro fator é a disponibilidade de via segura para a circulação de todos os tipos de usuários e modais.

A TEMÁTICA DE SINISTRO DE TRÂNSITO E SEUS DESDOBRAMENTOS NO BRASIL

A temática de sinistro de trânsito é amplamente discutida em nível mundial, dado o número de mortes e as deseconomias geradas por ela. A Conferência Mundial Ministerial sobre Segurança no



DOI: [10.29327/1430212.49-89](https://doi.org/10.29327/1430212.49-89)

UM ESTUDO DE CASO SOBRE SINISTROS DE TRÂNSITO NA RODOVIA BR-277/PR
E AS AÇÕES PREVISTAS NOS PROGRAMAS DE CONCESSÃO RODOVIÁRIA PARA MELHORIA DA SEGURANÇA VIÁRIA

Trânsito: Tempo de Agir, realizada em Moscou em novembro de 2009, demonstrou a necessidade de uma ação coordenada, assumindo a Organização Mundial de Saúde (OMS), endossada pela ONU, a responsabilidade por uma campanha mundial pela redução dos sinistros de trânsito. A Resolução da Assembleia Geral da ONU 64/255, de 10 de maio de 2010 (ONU, 2010), deliberou sobre a melhoria global da segurança rodoviária, com base em resoluções anteriores de 2003, 2004, 2005 e 2008 e proclamou o período de 2011 -2020 como a “Década de Ação pela Segurança no Trânsito”, com o objetivo de reduzir os sinistros de trânsito em todo o mundo. A publicação do documento “Plano de Ação para a Década” se tornou a base referencial para a elaboração, por cada país membro, de um plano para definir políticas, programas, ações e metas para redução de fatalidades em sinistros de trânsito em 50% ao longo de 10 anos. Este documento descrevia recomendações baseadas em intervenções comprovadas e efetivas para prevenir traumas no trânsito, com uma visão global e sistêmica para que as ações fossem direcionadas a abordagem de Sistemas Seguros, em que se reconhece que as pessoas, veículos e infraestrutura viária devem interagir de maneira a se assegurar a segurança viária entre todos.

O Brasil como membro fundador da ONU e alinhado a Resolução ONU 64/255, lançou em maio de 2011, a “Década de Ação pela Segurança no Trânsito”, sendo o marco para várias ações dos órgãos nacionais envolvidos no provimento de infraestrutura viária e na fiscalização de trânsito. Este programa desencadeou ações legislativas a partir de estudos internacionais e dos desenvolvidos pelo Comitê Nacional de Mobilização pela Saúde, Segurança e Paz no Trânsito. Somente em 2018 foi sancionada a Lei n.º 13.614, que criou o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito – PNATRANS (Brasil, 2018), propondo um novo desafio para a gestão de trânsito, com a meta de reduzir em um período de 10 anos, no mínimo à metade o índice nacional de mortos no trânsito por grupo de veículos e o índice nacional de morto no trânsito por grupo de habitantes, tomando como base referencial o ano de 2018. As metas de redução do índice de mortos no trânsito são fixadas anualmente pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) para cada um dos estados da Federação e para o Distrito Federal, a partir das propostas dos Conselhos Estaduais de Trânsito (CETTRAN), do Conselho de Trânsito do Distrito Federal (CONTRANDIFE) e da Polícia Rodoviária Federal (PRF), no âmbito das respectivas circunscrições. A Lei do PNATRANS incluiu o art. 326-A ao Código Brasileiro de Trânsito (CTB), de forma que as ações dos integrantes do Sistema Nacional de Trânsito sejam direcionadas para o cumprimento de metas anuais de redução dos índices de mortos em vias federais, estaduais e municipais.

O PNATRANS foi um passo importante na definição de iniciativas alinhadas a ação da ONU, tendo como base seis pilares. Este plano nacional se juntou a outras iniciativas governamentais, de empresas privadas, instituições de ensino e pesquisa, organizações não governamentais, dentre outras, com a meta de redução da sinistralidade rodoviária.

A OMS em outubro de 2021, apoiada pela ONU através da Resolução da Assembleia Geral da ONU 74/299, anunciou a continuidade da “Década de Ação pela Segurança no Trânsito”, mas agora para o período de 2021 - 2030, mantendo a meta audaciosa de redução de ao menos 50% das mortes e lesões no trânsito até 2030, atualizando o documento “Plano Global: Década de ação pela Segurança no Trânsito 2021-2030” (OMS, 2021).

Desta forma, o PNATRANS passou por uma revisão, em que as lições aprendidas nos anos anteriores e o aprimoramento de abordagens de segurança viária e das tecnologias disponíveis, permitiram desenvolver 12 metas globais de desempenho, totalizando 154 ações e que podem ser consultadas no “Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito 2021 -2030” (MINFRA, 2021).



Específico para a melhoria da segurança em rodovias, cabe destacar as ações abaixo descritas:

- 1. Parada – Um Pacto pela Vida:** Programa do Ministério das Cidades, com a mediação do antigo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), lançado em maio de 2011 com o objetivo de promover campanhas de conscientização, ações educativas e de mobilização para diminuir o número de mortes e outros danos causados por sinistros de trânsito. Ao longo dos anos, muitas empresas privadas, organizações não governamentais, gestores públicos, educadores, profissionais de trânsito, associações e personalidades dos meios artístico e desportivo aderiram ao pacto e trabalham para transformar o trânsito em um espaço seguro para todos, através Semana Nacional do Trânsito e do Maio Amarelo.
- 2. Programa RodoVida:** Programa da PRF, estabelecido pela Resolução CONTRAN n.º 897, de 9 de março de 2022, substituindo a Operação RodoVida, que se iniciou em 2011 e foi encerrada em 2018. O programa se baseia no levantamento estatístico de sinistros de trânsito nas rodovias federais, bem como nas rodovias estaduais e municipais, sendo então planejada e executadas operações integradas de diversos órgãos, como PRF, Polícia Rodoviária Estadual, Polícia Civil, Departamentos de Trânsito, da segunda quinzena de dezembro até o final do carnaval.
- 3. Operação Vita e GIAT:** A PRF planejou a primeira Operação Temática de Diagnóstico de Pontos Críticos de Acidentalidade, designada de ‘Operação VITA’, cujo objetivo principal foi o mapeamento e diagnóstico de fatores de riscos nos trechos de maior criticidade de sinistros com ferimento de natureza grave nas rodovias federais do país, com a melhoria da qualidade da coleta de dados por meio da padronização, otimização do diagnóstico de fatores de risco que impactam a segurança viária, bem como adoção de medidas voltadas para fiscalização, educação para o trânsito, engenharia de tráfego, entre outras. A orientação e treinamento dos Grupos de Investigação de Acidentes de Trânsito (GIAT), criados em 2019 em todas as superintendências da PRF, foi realizada, enfocando a realização de inspeções técnicas viárias utilizando padrão preestabelecido de coleta de dados a contemplar os fatores de risco relacionados aos componentes viários/ambientais e humanos.
- 4. Programa BR-Legal:** Especificamente para a infraestrutura de rodovias, o Ministério dos Transportes, por meio do Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre (DNIT), criou em 2012 o Programa Nacional de Segurança e Sinalização Rodoviária (BR-Legal) para a melhoria de segurança através de sinalização em 55 mil quilômetros de rodovias federais, com a contratação de empresas em 2014 para realização de serviços de melhorias ao longo de 5 anos. O Programa BR-Legal incluiu uma série de inovações na sinalização e nos equipamentos de segurança viária. Com as lições aprendidas com o primeiro programa, em 2023 o DNIT anunciou o Programa BR-Legal 2 para cerca de 11 mil quilômetros de rodovias.
- 5. Programa iRAP:** O *iRAP* é uma organização sem fins lucrativos de prevenção de mortes em vias, que trabalha em parcerias com o objetivo de melhoria da segurança viária para todos os tipos de usuários, como pedestres, ciclistas, motociclistas e ocupantes de veículos. A organização desenvolveu diversas ferramentas pela ótica de segurança viária, sendo uma delas a de avaliação de infraestrutura viária denominada “Classificação por Estrelas”. As estrelas identificam uma pontuação, que varia de 1 (um) a 5 (cinco), sendo a menor nota para as vias de menor segurança e a maior nota para as vias mais seguras. Dos resultados “Classificação por Estrelas”, em função dos atributos considerados mais propensos a causar sinistros, a metodologia permite identificar um conjunto de medidas e melhorias a serem adotadas para a segurança viária, definidas como contramedidas, cuja proposição de implementação ocorre por meio do “Plano de Investimento em Rodovias Mais Seguras (SRIP)”. No Brasil o Departamento Global



DOI: [10.29327/1430212.49-89](https://doi.org/10.29327/1430212.49-89)

UM ESTUDO DE CASO SOBRE SINISTROS DE TRÂNSITO NA RODOVIA BR-277/PR
E AS AÇÕES PREVISTAS NOS PROGRAMAS DE CONCESSÃO RODOVIÁRIA PARA MELHORIA DA SEGURANÇA VIÁRIA

de Segurança Viária do Banco Mundial convidou o *iRAP* para trabalhar com o Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP), tendo sido avaliada 4.200 de rodovias estaduais de São Paulo. Em 2019, uma parceira do *iRAP* e do DNIT, estabeleceu o Programa *BrazilRAP*, tendo o DNIT realizado a classificação por estrelas de 54.500 km de rodovias federais pavimentadas sob sua administração. A *International Finance Corporation (IFC)*, organismo ligado ao Banco Mundial, para apoiar a estruturação de estudos de viabilidade de lotes de concessão rodoviária no Brasil desde 2019, passou a realizar a avaliação de infraestrutura viária denominada “Classificação por Estrelas”, assim como o SRIP para as contramedidas a serem implantadas pela futura concessionária. De lá para cá, observou-se o uso da “Classificação por Estrelas” em diversos estudos de viabilidade de lotes de concessão rodoviária.

OS PROGRAMAS DE CONCESSÃO DE RODOVIAS NO ESTADO DO PARANÁ

O Programa de Concessão Rodoviária Anel de Integração do Paraná

No início da década de 90 o setor de infraestrutura de transportes no Brasil passava por uma crise de investimentos em ampliação, recuperação e manutenção na malha rodoviária e a solução adotada foi iniciar estudos para a exploração, pelo setor privado, de trechos rodoviários. O estado do Paraná realizou estudos de viabilidade de concessão rodoviária e a estruturação resultou em 6 (seis) lotes (Figura 1), no denominado Programa Anel de Integração do Paraná. Este programa abrangeu a malha principal das rodovias federais e rodovias estaduais em todo o estado, totalizando cerca de 2.500 quilômetros de trechos rodoviários. Os 6 (seis) contratos de concessão iniciaram em novembro de 1997 e término ocorreu em novembro de 2021.



Figura 1. Os 6 Lotes de Concessão Rodoviária do Programa Anel de Integração do Paraná (Fonte: DER/PR, 2023)

Especificamente neste estudo de caso, a análise de sinistros rodoviários ocorreu na rodovia BR-277, no segmento entre o entroncamento com a BR-376/PR-082 (São Luiz do Purunã, km 147,50) e o entroncamento com a BR-376 (acesso Oeste de Curitiba, km 107,30), destacado no retângulo na Figura 2. Este segmento estava inserido no Lote 05, concedido a Concessionária de Rodovias Integradas S/A – Rodonorte e destacado em vermelho na Figura 2.

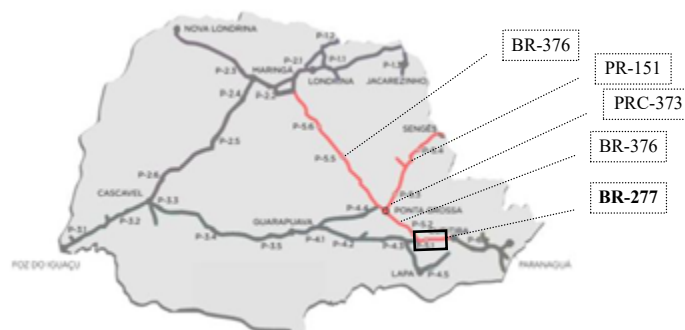


Figura 2. Rodovias do Lote 5 - Rodonorte do Programa Anel de Integração do Paraná (Fonte: DER/PR, 2023)

O Programa de Concessão Rodoviária Rodovias Integradas do Paraná

Com a previsão de término dos 6 (seis) lotes de concessão rodoviária do Programa Anel de Integração do Paraná em novembro de 2021, o Governo Federal em parceria com o Governo do do Paraná, iniciou as tratativas de novos estudos de viabilidade para a manutenção de concessões rodoviárias, no denominado Programa Rodovias Integradas do Paraná, com uma extensão total aproximada de 3.350 km (Figura 3).



Figura 3. Os 6 Lotes de Concessão Rodoviária do Programa Rodovias Integradas do Paraná (Fonte: DER/PR, 2023)

Em análise da distribuição dos segmentos rodoviários dos novos 6 lotes, a rodovia BR-277 entre o entroncamento com a BR-376/PR-082 (São Luiz do Purunã, km 147,50) e o entroncamento com a BR-376 (acesso Oeste de Curitiba, km 107,30), passou a ser inserido no Lote 01 (Figura 4). O leilão do Lote 01, Edital de Concessão n.º 01/2023 da ANTT, ocorreu em 25 de agosto de 2023, sagrando-se vencedor o Consórcio Infraestrutura Brasil Holding XXI S.A, controlado pelo grupo Pátria Investimentos. A sociedade de propósito específico (SPE) constituída pelo consórcio vencedor foi denominada Via Araucária Concessionária de Rodovias S.A., que assinou com o poder outorgante, a ANTT, em 30 de janeiro de 2024, um contrato de 30 anos.

DOI: [10.29327/1430212.49-89](https://doi.org/10.29327/1430212.49-89)

UM ESTUDO DE CASO SOBRE SINISTROS DE TRÂNSITO NA RODOVIA BR-277/PR
E AS AÇÕES PREVISTAS NOS PROGRAMAS DE CONCESSÃO RODOVIÁRIA PARA MELHORIA DA SEGURANÇA VIÁRIA

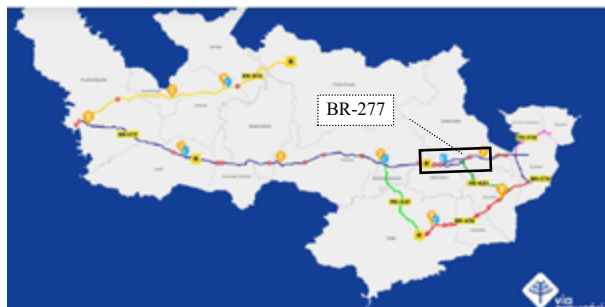


Figura 4. Rodovias do Lote 1 do Programa Rodovias Integradas do Paraná (Fonte: Via Araucária, 2024)

A ABORDAGEM DE SEGURANÇA VIÁRIA NOS PROGRAMAS DE CONCESSÃO DE RODOVIAS NO ESTADO DO PARANÁ

Os sinistros de trânsito na BR-277 entre 2018 e 2023

A rodovia BR-277 é uma rodovia transversal, que atravessa o estado do Paraná de leste a oeste, fazendo a ligação do município litorâneo de Paranaguá, até o município de Foz do Iguaçu, na divisa com o Paraguai. Tem um total de 736,60 quilômetros de extensão e é um dos principais corredores de movimentação de pessoas e cargas no estado. Especificamente neste estudo de caso, a análise de sinistros de trânsito se deu no segmento entre o entroncamento com a BR-376/PR-082 (São Luiz do Purunã, km 147,50) e o entroncamento com a BR-376 (acesso Oeste de Curitiba, km 107,30), em que a seção transversal é de pista dupla, com trechos planos e ondulados.

A Figura 5 abaixo apresenta a distribuição das 2.640 vítimas de sinistro de trânsito entre os anos de 2018 e 2023 registrados pela PRF (PRF, 2023). Pode-se identificar dois segmentos com maior concentração.



Figura 5. Distribuição de vítimas de sinistro de trânsito totais na BR-277, no trecho entre Curitiba e o acesso a BR-376/PR-082 para o período de 2018 a 2023 (Fonte: adaptado pelo autor de PRF, 2023)

Quando analisada a distribuição das 1.092 vítimas com ferimento, ela é homogênea no início do segmento da BR-277 em Curitiba, com uma maior concentração no trecho da Serra de São Luiz do Purunã, como se observa na Figura 6.



Figura 6. Distribuição de vítimas com ferimento nos sinistros de trânsito na BR-277, no trecho entre Curitiba e o acesso a BR-376/PR-082 para o período de 2018 a 2023 (Fonte: adaptado pelo autor de PRF, 2023)



Em relação à distribuição das 84 vítimas fatais dos sinistros de trânsito, para o período de 2018 a 2023, entre o quilômetro 107,30 e quilômetro 122,90 (SNV 277BRP0055) se concentram a maioria dos óbitos (PRF, 2023). O uso e ocupação do solo lindeiro a este trecho é urbano e industrial, com diversos bairros do município de Campo Largo (Figura 7).

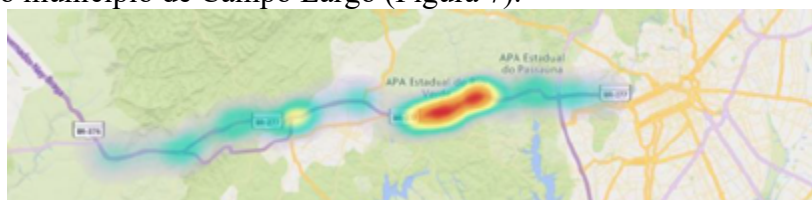


Figura 7. Distribuição de vítimas fatais dos sinistros rodoviários na BR-277, no trecho entre Curitiba e o acesso a BR-376/PR-082 para o período de 2018 a 2023 (Fonte: adaptado pelo autor de PRF, 2023)

Em análise do tipo de sinistro de trânsito com vítima fatal, a maioria foi por atropelamento de pessoas (33%), seguido de queda de ocupante do veículo (10%). A colisão com objetos representava 7%. Quanto à colisão entre veículos, a traseira representava 8%, a frontal e a transversal 6 % cada uma (PRF, 2023).

Para os atropelamentos de pessoas, 27 vítimas fatais foram pedestres e 1 ciclista, sendo 23 do sexo masculino. Quase todos os atropelamentos ocorreram no período noturno. Os fatores geradores registrados pela PRF (PRF, 2023), foram de 12 situações por falta de atenção do pedestre, 2 situações de pedestre sob efeito de ingestão de álcool/drogas, 2 situações de travessia fora de faixa de pedestre, 2 situações de entrada inopinada do pedestre, 1 situação de desobediência as leis de trânsito. Quanto ao ciclista, o fator gerador registrado pela PRF foi de falta de atenção dele. Em 2 situações do atropelamento de pessoas, a PRF registrou que o condutor do veículo estava a transitar em velocidade incompatível ao segmento rodoviário e nas demais 6 situações o condutor teve reação tardia ou falta de atenção.

O enfoque da segurança viária no Programa de Concessão Anel de Integração do Paraná

Analisando a infraestrutura existente para travessia de pedestres e ciclistas implantada pela antiga concessionária do Lote 5, havia 5 passarelas distribuídas no trecho de maior incidência de atropelamentos que levaram a óbito da vítima (Figura 8), com 3 passarelas na região de uso e ocupação de solo urbano na região do quilômetro 110,00 (Figura 9).



Figura 8. Distribuição das passarelas entre o quilômetro 107,30 e o 122,90 (SNV 277BRP0055) da BR-277 (Fonte: DER/PR, 2023 e Google Earth, 2024)



DOI: [10.29327/1430212.49-89](https://doi.org/10.29327/1430212.49-89)

UM ESTUDO DE CASO SOBRE SINISTROS DE TRÂNSITO NA RODOVIA BR-277/PR
E AS AÇÕES PREVISTAS NOS PROGRAMAS DE CONCESSÃO RODOVIÁRIA PARA MELHORIA DA SEGURANÇA VIÁRIA



Figura 9. Passarelas entre o quilômetro 109,50 e o 110,50 (Fonte: DER/PR, 2023 e Google Earth, 2024)

Pode se observar pelas imagens da Figura 9, foi implantado pela concessionária Rodonorte uma cerca para coibir o atravessamento dos pedestres pela rodovia. Analisando o local de implantação das passarelas, todas estão na proximidade de vias de acesso aos bairros, com iluminação e ponto de ônibus identificado por sinalização vertical e horizontal. Existem alguns conflitos de trânsito entre a via principal e a via alimentadora, com pontos de visibilidade parcial e a inexistência de faixa de pedestre para todos os movimentos de pedestres.

Em análise dos relatórios mensais de gestão de segurança rodoviária encaminhados pela concessionária Rodonorte para o poder concedente DER/PR, ela apresentava os registros de sinistros e identificação dos principais elementos de segurança implantados. A concessionária também promovia campanhas educativas (DER/PR, 2023).

Analisando o atendimento dos elementos de sinalização do trecho em estudo, tomando como base os parâmetros estabelecidos no Programa de Exploração da Rodovia (PER) o DER/PR apurou em 2021 (DER/PR, 2023), que para a sinalização vertical de regulamentação e advertência, 79% atendiam a dimensão estipulada, 95% atendiam em termos de retrorefletância e 61% atendiam à conservação, sendo a maioria do não atendimento devido à sujidade da placa. Quanto às marcas longitudinais e de canalização, 100% atendiam em termos de retrorefletância e 94% atendiam em termos de conservação. Para as defensas metálicas, 73% atendiam em termos de dimensão e 84% em termos de conservação. Em termos de barreiras de concreto, 78% atendiam a dimensão e 95% em termos de conservação.

Em relação as condições do pavimento no trecho em estudo, o DER/PR apurou em 2021 (DER/PR, 2023), que as condições estruturais atendiam em sua maioria os parâmetros do PER. Para condições de superfície, alguns segmentos e em faixas específicas, havia parâmetros inferiores aos definidos no Contrato de Concessão, mas que não estavam no segmento da BR-277 em estudo.

O enfoque da segurança viária no Programa de Concessão Rodovias Integradas do Paraná

Em consulta aos Estudos de Viabilidade do Programa de Concessão Rodovias Integradas do Paraná do Lote 01, no Produto 2 - Estudos de Engenharia, um dos tomos foi o Relatório Inicial



Metodológico de Inspeção de Segurança Rodoviária (ISR) realizado conforme metodologia de avaliação *iRAP*, com a “Classificação por Estrelas” de todos os segmentos rodoviários do lote (ANTT, 2023a). Em específico para a BR-277, entre o quilômetro 107,30 e quilômetro 147,50, tanto para ocupantes de veículos, quanto motociclistas e pedestres, a avaliação resultou numa classificação de 1 estrela (identificado em preto) e 2 estrelas (identificado vermelho) (Figura 10).



Figura 10. Resultado da Classificação por Estrelas do quilômetro 107,30 ao 147,50 da BR-277 (Fonte: ANTT, 2023a)

As principais contramedidas para melhoria das condições de segurança foram à implantação de defensas metálicas/barreiras de concreto na borda da pista do lado do passageiro e do condutor, a implantação de sonorizadores ao longo do acostamento e que podem ser consultadas da Figura 11.



Figura 11. Principais contramedidas a adotar do quilômetro 107,30 ao 147,50 da BR-277 (Fonte: ANTT, 2023a)

Também no Produto 2 - Estudos de Engenharia, Tomo VI – Programa de Investimentos, Melhorias e ampliação de capacidade (ANTT, 2023b), integram as obras de ampliação de capacidade e melhorias obrigatórias, a implantação de vias marginais, passarelas, melhorias de acesso, dentro outros que devem ser executadas conforme cronograma apresentado no PER. Para o trecho da BR-277 em estudo, há a previsão de implantação de vias marginais e de uma nova passarela, devendo em ambos os casos se realizar a implantação de iluminação pública.

Ainda é previsto um estoque de obras de melhorias, considerando implantação de marginais, passarelas, acessos, dentre outras, a serem implantadas ao longo do período de concessão em pontos identificados como críticos (ANTT, 2023b).

Considera ainda que as obras de melhorias para a segurança viária deverão ser propostas pela concessionária, com a finalidade de aumentar a “Classificação por Estrelas” definida para cada um dos períodos da concessão (Figura 12). Para tal, cabe a concessionária realizar o Relatório de Inspeção de Segurança Rodoviária (ISR) para toda a extensão do lote, seguindo a metodologia *iRAP*, com o primeiro levantamento, codificação e produção de relatório até o 2º ano da concessão, e quinquenalmente após a apresentação do primeiro (ANTT, 2023c).

Trechos* c/ Investimentos	Fase			
	Trabalhos Iniciais	Recuperação	Ciclo de Investimentos	Pós Ciclo de Investimentos**
NÃO	**	***	-	**** *****
SIM	**	***	****	*****

Figura 12. Parâmetros técnicos para Classificação por Estrelas para o Lote 01 (Fonte: ANTT, 2023c)



DOI: 10.29327/1430212.49-89

UM ESTUDO DE CASO SOBRE SINISTROS DE TRÂNSITO NA RODOVIA BR-277/PR E AS AÇÕES PREVISTAS NOS PROGRAMAS DE CONCESSÃO RODOVIÁRIA PARA MELHORIA DA SEGURANÇA VIÁRIA

Continuando a consulta, no Produto 3 - Relatório de Modelo Operacional, é previsto que ao longo dos 30 anos de concessão, seja elaborado pela concessionária um programa de prevenção e redução de sinistros de trânsito e de segurança rodovia. A concessionária deverá prever ações para promoção de segurança, com a adoção de medidas de engenharia, operacionais, educativas e coercitivas, devendo realizar estas proposições a cada 2 anos. (ANTT, 2023d).

COMENTÁRIOS FINAIS

Neste estudo de caso se fez uma breve análise de sinistros de trânsito na BR-277 no estado do Paraná, no segmento rodoviário entre os municípios de Balsa Nova e Curitiba para o período de 2018 e 2023. Foi identificado um trecho crítico com a maior concentração de sinistros de trânsito com vítima fatal, do tipo atropelamento de pessoas, no município de Campo Largo. Em análise dos registros da PRF para os fatores geradores dos sinistros, o fator humano relacionado ao comportamento do pedestre, ciclista e condutor do veículo, foi a principal causa para a ocorrência, com falta de atenção de condutores ou imprudência de pessoas. Analisando o estado de pavimento e sinalização no ano de 2021, não se pode concluir que o fator viário tenha contribuído para a ocorrência, dado que quase todo o segmento em estudo atendia os parâmetros do PER. Também foram verificadas as medidas que foram previstas e implementadas pela antiga empresa concessionária do Lote 05, sendo que ela adotou medidas de implantação de passarelas, telas no canteiro central, sinalização horizontal, dentre outras. Apesar da existência de dispositivos para travessia segura, barreiras para coibir o atravessamento em trechos rodoviários perigosos, a tomada de decisão da pessoa em atravessar a pista foi fatal para 27 pessoas nos últimos 6 anos. Também foi verificado no estudo de viabilidade do novo lote de concessão rodoviária o resultado da “Classificação por Estrelas”, que demonstrou o trecho como de alto risco a condutores, motociclistas e pedestres, tendo recebido classificação 1 ou 2 estrelas. Quanto às contramedidas descritas no ISR, tem-se a implantação de defensas/barreiras ao longo do trecho para coibir o atravessamento de pedestres, bem como implantação de sonorizadores na pista, para se atingir ao longo da fase de recuperação prevista no PER, no mínimo 3 estrelas. Também é prevista implantação obrigatória de vias marginais, uma nova passarela, e ao longo do período de concessão, está previsto um estoque de infraestrutura para a melhoria das condições de segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 10697:2020: Pesquisa de sinistros de trânsito – Terminologia**. Rio de Janeiro, RJ, 2020, ISBN 978-65-5659-621-1.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE. **PR Vias – Lote 01, Produto 2 – Estudos de Engenharia, Tomo VI – Programa de Investimentos, Anexo 2.6.d iRAP, 2023a**. Disponível em: <https://antt.gov.sharepoint.com/sites/sucon/dataroom/Documentos/Forms/AllItems.aspx?ga=1&id=%2Fsites%2Fsucon%2Fdataroom%2FDocumentos%2FPortal%2FRodovias%2FRodovias%20do%20Paran%C3%A1%2FAUDI%C3%8ANCIA%20P%C3%9ABLICA%20N%C2%B0%2001%2D2021%2F2P%C3%B3s%20Audi%C3%Aancia%20P%C3%BAblica%2FEstudos%2FLote%201%2F2%2E%20Engenharia%2DL1%2F5%2D%20iRAP&viewid=320e6953%2D9cd9%2D4593%2D8dc7%2De76520962837> < acesso realizado em 20/04/2024 >.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE. **PR Vias – Lote 01, Produto 2 – Estudos de Engenharia, Tomo VI – Programa de Investimentos, Melhorias e ampliação capacidade, 2023b**. Disponível em: <https://antt.gov.sharepoint.com/sites/sucon/dataroom/Documentos/Forms/AllItems.aspx?ga=1&id=%2Fsites%2Fsucon%2Fdataroom%2FDocumentos%2FPortal%2FRodovias%2FRodovias%20do%20Paran%C3%A1%2FAUDI%C3%8A>



[NCIA%20P%C3%9ABLICA%20N%C2%B0%2001%2D2021%2FP%C3%B3s%20Audi%C3%Aancia%20P%C3%BAblica%2FEstudos%2FLote%201%2F2%2E%20Engenharia%2DL1%2F8%2D%20Tomos&viewid=320e6953%2D9cd9%2D4593%2D8dc7%2De76520962837](#) < acesso realizado em 20/04/2024>.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE. **PR Vias – Lote 01, Anexo 2, Programa de Exploração da Rodovia, 2023c.** Disponível em: <https://www.gov.br/ant/pt-br/assuntos/rodovias/concessionarias/lista-de-concessoes/via-araucaria/documentos-de-gestao/anexos-do-contrato/per-original/view> < acesso realizado em 20/04/2024>.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE. **PR Vias – Lote 01, Produto 3 – Relatório de Modelo Operacional, 2023d.** Disponível em: <https://antgov.sharepoint.com/sites/sucon/dataroom/Documentos/Forms/AllItems.aspx?ga=1&id=%2Fsites%2Fsucon%2Fdataroom%2Fdocumentos%2Fportal%2Frodovias%2Frodovias%20do%20Paran%C3%A1%2FAUDI%C3%8ANCIA%20P%C3%9ABLICA%20N%C2%B0%2001%2D2021%2FP%C3%B3s%20Audi%C3%Aancia%20P%C3%BAblica%2FEstudos%2FLote%201%2F2%2E%20Engenharia%2DL1&viewid=320e6953%2D9cd9%2D4593%2D8dc7%2De76520962837> < acesso realizado em 20/04/2024>.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE. **Histórico das Concessões Rodoviárias Federais, 2024.** Disponível em: <https://www.gov.br/ant/pt-br/assuntos/rodovias/concessionarias/historico> < acesso realizado em 25/04/2024>.

BRASIL. Lei n.º 13.614, de 11 de janeiro de 2018. Cria o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2018. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2015-2018/2018/lei/L13614.htm < acesso realizado em 28/04/2024>.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de; GUEDES, Erivelton Pires. **Balanco da primeira década de ação pela segurança no trânsito no Brasil e perspectivas para a segunda década.** Nota Técnica 42 da Diretoria de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais. Brasília, DF: Ipea, nov. 2023.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO PARANÁ. **Concessões Rodoviárias, 2023.** Disponível em: <https://www.der.pr.gov.br/Pagina/Concessoes-Rodoviaras> <acesso em 30/04/2024>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA. **Instrução de Serviço n.º 04, de 12 de fevereiro de 2016.** Brasília, DF. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/operacoes-rodoviaras/programa-br-legal/manual_BRLEGAL.pdf <acesso em 28/04/2024>

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Resolution 64/255, 2010.** Disponível em: <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n09/477/13/pdf/n0947713.pdf?token=dBAllbQBSOyd8EPQTK&fe=true> < acesso realizado em 28/04/2024>.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Plano Global: Década de ação pela segurança no trânsito 2021-2030, 2021.** Disponível em: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/documents/health-topics/road-traffic-injuries/global-plan-for-the-doa-of-road-safety-2021-2030-pt.pdf?sfvrsn=65cf34e8_35&download=true < acesso realizado em 28/04/2024>.

MESQUITA FILHO, MARCOS. *Acidentes de trânsito: as consequências visíveis e invisíveis à saúde da população.* **In: Revista Espaço Acadêmico, n.º 128, Janeiro de 2012, Ano XI, ISSN 1519-6186.**

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito 2021-2030, 2021.** Brasília, DF. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/anexo_i_pnatrans_2.pdf < acesso realizado em 28/04/2024>.

POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL. **Atlas da Década de Ações para Segurança Viária: Polícia Rodoviária Federal, 2021.** Brasília, DF.

POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL. **Dados Abertos da PRF 2022, 2023.** Brasília, DF. Disponível em: <https://www.gov.br/prf/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/dados-abertos-da-prf> < acesso realizado em 28/04/2024>.

Programa de Parceria de Investimentos. **Projetos, 2024.** Brasília, DF. Disponível em: <https://ppi.gov.br/projetos/rodovias-integradas-do-parana/> < acesso realizado em 28/04/2024>.



ANÁLISE DE ACIDENTALIDADE NAS RODOVIAS SOB ADMINISTRAÇÃO DO DER/SP UTILIZANDO MAPAS DE CALOR

Carolina Iris Brasil Mariano¹; Rafael Grinberg Chasles¹; Fabiana Gurkas Brunoro¹; José Luiz Fuzaro Rodrigues¹; Gean Kenid Sifronio Franco¹; Vinicius do Prado Capanema¹; Bruna Donegá Alves¹ & Anderson Barbosa Esteves¹

RESUMO

Este artigo oferece uma análise geral da incidência de acidentes nas rodovias sob a administração do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP), empregando uma abordagem geoespacial por meio de mapas de calor, utilizando o método de densidade de Kernel. Após introduzir o contexto global dos acidentes de trânsito e esclarecer termos pertinentes à segurança viária, a pesquisa detalha a metodologia empregada para coletar dados sobre acidentes e para gerar os mapas de calor (*heatmaps*). Os resultados apresentam a distribuição tanto dos acidentes totais quanto das vítimas fatais, além de exemplificar um caso típico de acidente ocorrido em 2023 nas estradas estaduais sob a jurisdição do DER/SP. Além disso, o artigo fomenta uma discussão sobre a relevância do mapeamento da acidentalidade para fundamentar decisões na gestão do tráfego por parte de uma autarquia pública. Como desdobramento das análises conduzidas pelo DER/SP, a autarquia se empenha em estabelecer metas de curto, médio e longo prazos visando à efetiva redução do número de mortes e ferimentos graves nas estradas sob sua responsabilidade. Esse esforço se concentra na proteção dos usuários vulneráveis, na identificação de deficiências na infraestrutura viária e no monitoramento das tendências de acidentalidade. Essa iniciativa culmina na formulação de um abrangente Plano de Segurança Viária, consolidando um compromisso com a segurança e a integridade dos usuários das rodovias paulistas.

PALAVRAS-CHAVE: acidentes rodoviários; geoprocessamento; *heatmaps*; densidade de Kernel.

ABSTRACT

This article provides a general analysis of the incidence of accidents on highways under the administration of the Department of Roads of the State of São Paulo (DER/SP), employing a geospatial approach through heatmaps using the Kernel density method. After introducing the global context of traffic accidents and clarifying terms relevant to road safety, the research details the methodology used to collect data on accidents and to generate heatmaps. The results present the distribution of both total accidents and fatalities, as well as exemplifying a typical accident case that occurred in 2023 on state highways under the jurisdiction of DER/SP. Furthermore, the article fosters a discussion on the relevance of accident mapping to support decision-making in traffic management by a public agency. As a result of the analyses conducted by DER/SP, the agency is committed to establishing short, medium, and long-term goals aimed at effectively reducing the number of deaths and serious injuries on the roads under its responsibility. This effort focuses on protecting vulnerable users, identifying deficiencies in road infrastructure, and monitoring accident trends. This initiative culminates in the formulation of a comprehensive Road Safety Plan, consolidating a commitment to the safety and integrity of users of São Paulo's highways.

KEY WORDS: road accidents; geoprocessing; heatmaps; Kernel density.

¹ DER/SP – Diretoria de Planejamento (DP) - Coordenadoria de Estudo e Pesquisa (CEP), cibmariano@der.sp.gov.br; rgchasles@der.sp.gov.br; fgbrunoro@der.sp.gov.br; ilfrodrigues@der.sp.gov.br; gksfranco@der.sp.gov.br; ypcapanema@der.sp.gov.br; bdalves@der.sp.gov.br; andersonestevess@der.sp.gov.br



INTRODUÇÃO

Anualmente, mais de 1,3 milhões pessoas morrem mundialmente em vias urbanas e rodovias e mais de 50 milhões ficam gravemente feridas ou com danos permanentes. Ou seja, são mais de 3,5 mil pessoas morrendo e mais de 136 mil pessoas ficando gravemente lesionadas a cada dia nas vias, mundialmente.

No Brasil, anualmente, os números referentes aos acidentes de trânsito chegam a 45 mil mortes e 300 mil lesionados gravemente.

O conceito de visão zero, oriundo da Suécia, tem como premissa de que nenhuma fatalidade no trânsito é aceitável. Ou seja, eventuais erros cometidos por usuários podem ser prevenidos ou amenizados a partir de alternativas seguras no trânsito como, por exemplo, a redução da velocidade permitida. A visão zero, ainda, acredita que a responsabilidade pela segurança no trânsito deve ser compartilhada entre todos os atores envolvidos nas dinâmicas viárias:

- Via;
- Veículo;
- Usuário.

Outro conceito ligado à visão zero é o das “Rodovias que Perdoam”, indicando que a infraestrutura viária segura é aquela capaz de “perdoar” os eventuais erros cometidos pelos usuários. Ou seja, uma via deve ser projetada e executada considerando as premissas seguras de minimização da severidade, quando da ocorrência de acidentes.

Este artigo trata de uma análise da acidentalidade de rodovias sob administração do DER/SP, a partir do método de espacialização dos pontos de acidentes em mapa.

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta de Dados

Com a disponibilização das informações sobre acidentes pelo Comando de Policiamento Rodoviário - CPRv, foi possível estudar o perfil das ocorrências, analisando aspectos como a faixa horária, tipo de acidente, localização e tipos de veículos envolvidos.

O Comando de Policiamento Rodoviário – CPRv mantém uma parceria com o DER/SP, disponibilizando mensalmente a planilha de acidentes. Nela constam informações como local, data, hora, tipo de acidente e tipo de veículo. A partir da disponibilização dessa base, o setor técnico do DER/SP realiza a conferência dos dados, tendo o cuidado na adequação da informação, eliminando acidentes duplicados e classificando o local de acordo com o cadastro rodoviário utilizado pelo órgão. A partir daí, é possível realizar estudos dos acidentes e monitorar os trechos de rodovias mais críticos, com o intuito de adotar medidas necessárias para prevenir a ocorrência de futuros acidentes e minimizar a gravidade das lesões.



DOI: 10.29327/1430212.49-84

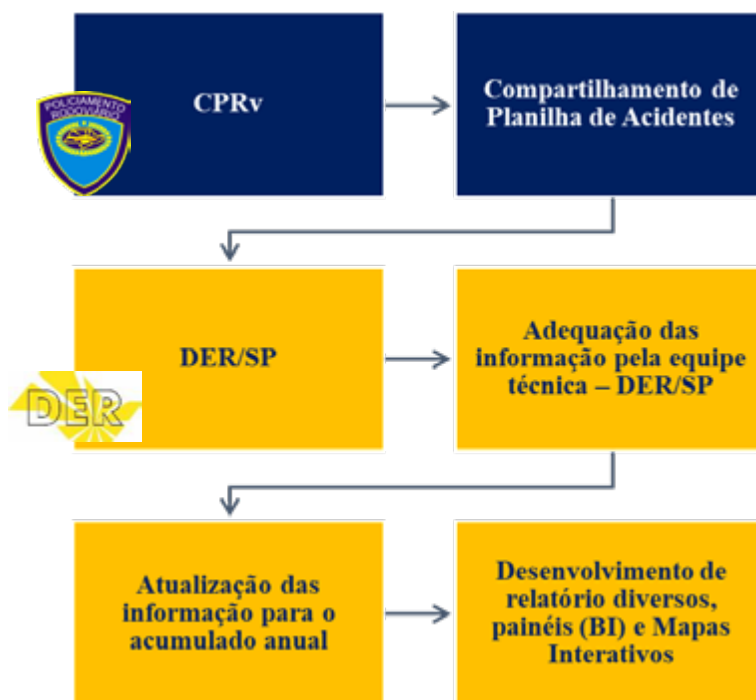
ANÁLISE DE ACIDENTALIDADE NAS RODOVIAS SOB ADMINISTRAÇÃO
DO DER/SP UTILIZANDO MAPAS DE CALOR

Figura 1. Fluxo de informação entre CPRv e DER/SP. (AUTORES, 2024).

Importante destacar que, a partir de 2011, houve uma mudança na coleta dos acidentes sem vítimas, em que o usuário passou a incluir os dados do acidente via internet. Com isto, estima-se que haja subnotificação no número de acidentes sem vítimas e totais.

Outro dado que pode influenciar na subnotificação de acidentes de trânsito é de que não há interligação entre os dados registrados pelo Policiamento Rodoviário e os dados de internações hospitalares. Muitos usuários vêm a óbito após a ocorrência do acidente e isso não é computado pelos dados da Polícia Rodoviária Estadual, atualmente.

Portanto, ressalta-se que, para análise presente neste artigo, será considerado os dados obtidos junto à Polícia Rodoviária Estadual, sem contabilizar as subnotificações provenientes dos casos citados.

Área de Análise

A malha rodoviária estadual de São Paulo é composta por mais de 22 mil km de extensão sendo, atualmente, 59% pertencente ao Departamento de Estradas de Rodagem (DER/SP) e 41% das rodovias administradas por concessões privadas. A Tabela 1 detalha a distribuição das extensões por administração.



Carolina Iris Brasil Mariano,
Rafael Grinberg Chasles, Fabiana Gurkas Brunoro,
José Luiz Fuzaro Rodrigues, Gean Kenid Sifronio Franco,
Vinicius do Prado Capanema, Bruna Donegá Alves & Anderson Barbosa Esteves

Tabela 1. Extensões e Administração malha Estadual Rodoviária de São Paulo (DER/SP, 2023)

Tipo de Rodovia	DER (km)	CONCESSÕES (km)	TOTAL ESTADUAL	FEDERAL (km)	MUNICIPAL (km)	TOTAL (km)
Eixo, acessos, interligações, contornos e dispositivos	13.231,67	9.056,84	22.288,51	1.027,19	176.697,23	200.012,94

Dados de Acidentes

A malha rodoviária estadual de São Paulo tem vivenciado uma queda no número de óbitos por acidentes de trânsito nos últimos anos, como revelam os dados da Polícia Militar Rodoviária do Estado.

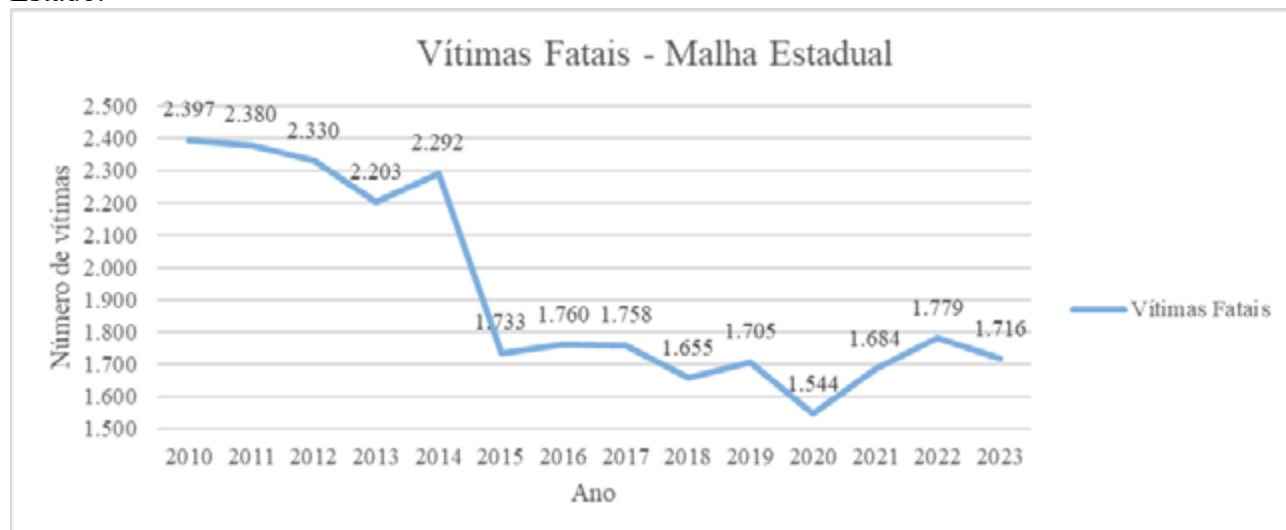


Figura 2. Óbitos por acidentes de trânsito no Estado de São Paulo entre 2010 e 2023. (PMRV, 2010-2023).

No ano de 2023, a Polícia Militar Rodoviária do Estado de São Paulo registrou na malha rodoviária estadual um total de 41.831 acidentes, sendo 21.321 acidentes com vítimas, e destas 20.772 com vítimas feridas e 1.560 com vítimas fatais. Esses acidentes resultaram em 23.633 feridos leves, 5.518 feridos graves e 1.716 vítimas fatais. Foram registrados ainda 19.499 acidentes sem vítimas. Na malha administrada pelo DER/SP foi verificada uma queda no número de acidentes e também no número de óbitos, mencionado anteriormente. A Figura 3 e a Figura 4 evidenciam o perfil de decréscimo nas quantidades e mortalidade de acidentes ao longo dos anos.

DOI: [10.29327/1430212.49-84](https://doi.org/10.29327/1430212.49-84)ANÁLISE DE ACIDENTALIDADE NAS RODOVIAS SOB ADMINISTRAÇÃO
DO DER/SP UTILIZANDO MAPAS DE CALOR

Figura 3. Total de acidentes de trânsito na malha rodoviária DER/SP. (CPRv, 2010-2023).

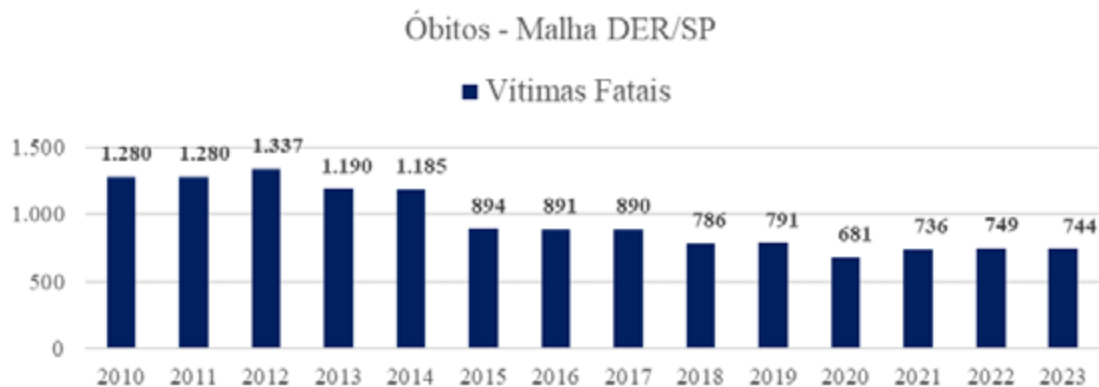


Figura 4. Óbitos em acidentes de trânsito na malha rodoviária DER/SP. (CPRv, 2010-2023).

Método de Espacialização dos Pontos dos Acidentes

O DER/SP possui sua malha rodoviária em formato vetorial georreferenciado em banco de dados relacionais. Este dado é constantemente atualizado pela equipe da Diretoria de Planejamento para realizações de novos cadastramentos, consultas e análises ou segmentação de trechos. Os principais atributos deste dado são sua identificação (ex.: SP 008), seu quilômetro inicial e final, sua denominação, jurisdição e administração e, tipo de pavimento, além de informações complementares como divisão regional, município etc. Para este artigo, foi utilizado este dado para espacialização dos acidentes rodoviários sob administração do DER/SP.

A Polícia Rodoviária Estadual, como já mencionado anteriormente, fornece os dados de acidentes apontando a rodovia em que ocorreu o episódio com sua respectiva quilometragem. Infelizmente, o sistema de registro dos acidentes ainda não possui coordenadas georreferenciadas (latitudes e longitudes). Por isso, para o método de espacialização dos acidentes foi utilizado o Boletim de Ocorrência (B.O) com as informações de rodovia e km, além da malha rodoviária espacial do DER/SP. O intervalo temporal para as análises compreendeu 01 de janeiro de 2023 à 31 de dezembro de 2023.

A partir deste dado, foi criado um estaqueamento virtual a cada 10 metros em toda a malha, a partir de ferramenta de geoprocessamento e SIG (Sistema de Informação Geográfica). A escolha do



Carolina Iris Brasil Mariano,
Rafael Grinberg Chasles, Fabiana Gurkas Brunoro,
José Luiz Fuzaro Rodrigues, Gean Kenid Sifronio Franco,
Vinicius do Prado Capanema, Bruna Donegá Alves & Anderson Barbosa Esteves

espaçamento foi devido à falta de precisão de anotação do B.O. Para cada ponto foi associado um código representando sua rodovia e sua distância em metros do início de cada trecho somado ao quilômetro inicial deste trecho, transformada em metros. Por exemplo, supondo que um trecho da rodovia SP 123 possui 1km, e se inicia no km 10,5km. O primeiro ponto criado é no marco zero e representa 10.500 metros, ou seja, SP 123 10.500, o ponto subsequente é adicionado 10 (metros), sendo assim, SP 123 10.510, e assim sucessivamente até o último ponto do trecho. Para cada ponto deste estaqueamento foram extraídas suas latitudes e longitudes em SIRGAS 2000. Após este processamento, foram unidos os dados dos B.O's com as coordenadas do estaqueamento, através do campo em comum da rodovia + km (ex.: SP 123 10.500). Este processamento é conhecido como *Spatial Join* em softwares GIS.

Após a espacialização de cada acidente, através do método supramencionado, foram realizadas análises espaciais conhecidas como *Heatmaps* (mapas de calor ou estimativa de densidade de Kernel). *Heatmaps* ou Estimativas de densidade de Kernel é calculada a partir da Equação (1).

$$Densidade = \frac{1}{(raio)^2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{3}{\pi} \cdot pop_i \left(1 - \left(\frac{dist_i}{raio} \right)^2 \right)^2 \right] \quad (1)$$

Para $dist_i < raio$.

Onde:

- $i = 1, \dots, n$ são os pontos de acidentes.
- pop_i é o valor do campo de população do ponto i , que é um parâmetro opcional.
- $dist_i$ é a distância entre o ponto i e o local (x, y ou long. lat.).

A densidade é calculada com base no número de pontos em uma localização, sendo que maiores números de pontos agrupados resultam em valores maiores (Silverman, 1986). O resultado de saída é uma imagem *raster* (ou matricial) onde, quanto mais adensada a quantidade de pontos, os valores ficam mais próximos de 1 e, na medida que a concentração diminui, esse valor tende a zero, pela distância. Mapas de calor permitem a fácil identificação de pontos de grande concentração e agrupamento. O raio adotado para esta análise foi de 50 quilômetros e os pontos analisados, foram, evidentemente, os acidentes espacializados.

Para análise de Unidade Padrão de Severidade (UPS) foi realizada uma segmentação a cada 1 quilômetro do dado vetorial da malha rodoviária e instituído um código sequencial para cada trecho, a partir do seu ponto inicial. Assim, o trecho 1 corresponde ao primeiro quilômetro da rodovia, o trecho 2 o segundo quilômetro, até o trecho n , consecutivamente. Após a segmentação e identificação do trecho, foi associado o valor de UPS dos dados tabulares tratados explicados anteriormente.



DOI: [10.29327/1430212.49-84](https://doi.org/10.29327/1430212.49-84)

ANÁLISE DE ACIDENTALIDADE NAS RODOVIAS SOB ADMINISTRAÇÃO
DO DER/SP UTILIZANDO MAPAS DE CALOR

RESULTADOS

Acidentes total

A partir do mapa de acidentes totais (Fig. 5), é possível observar uma concentração na região leste/nordeste da Divisão Regional de Sorocaba. Este *hotspot* de acidentes se destaca dos demais, porém possui pontos com altas concentrações na região da Divisão Regional de Campinas e de São Paulo.

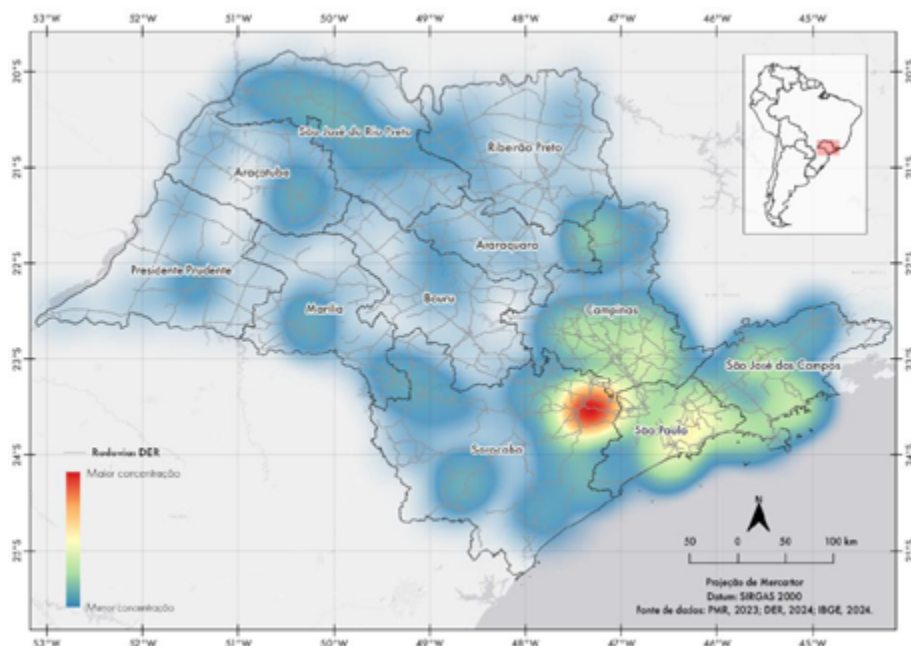


Figura 5. Heatmap dos acidentes totais na malha administrada pelo DER/SP, de 2023. (AUTOR, 2024).

Acidentes por tipo – exemplo: colisão frontal

Na análise de colisões frontais (Fig. 6) é possível observar um deslocamento de concentração dos acidentes totais (Fig. 5). Este tipo de acidente possui *hotspots* na região leste da Divisão Regional de São Paulo sendo que a maior concentração está na região metropolitana, principalmente no trecho da rodovia de descida da Serra do Mar.



Carolina Iris Brasil Mariano,
Rafael Grinberg Chasles, Fabiana Gurkas Brunoro,
José Luiz Fuzaro Rodrigues, Gean Kenid Sifronio Franco,
Vinicius do Prado Capanema, Bruna Donegá Alves & Anderson Barbosa Esteves

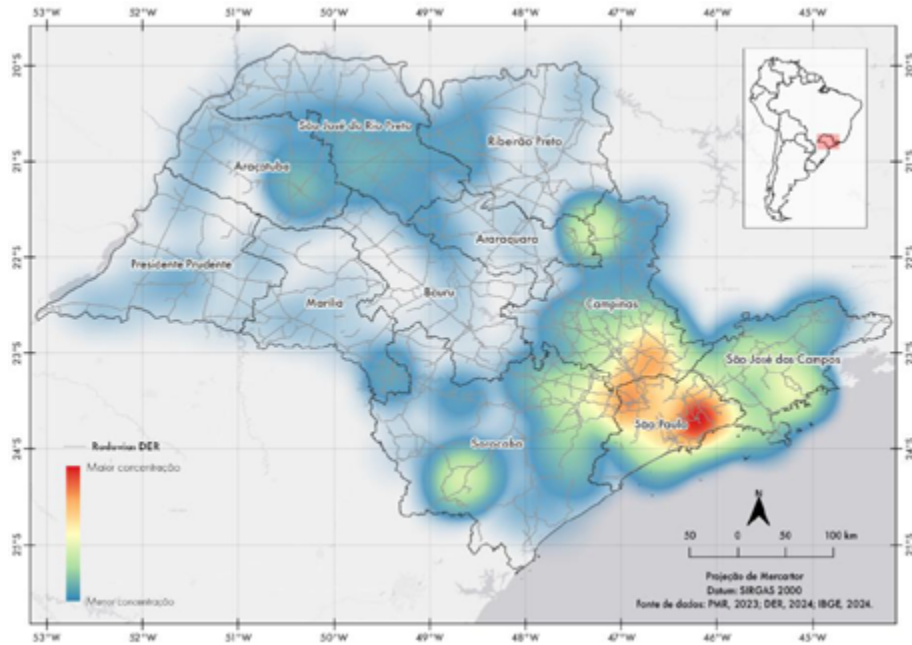


Figura 6. Heatmap de acidentes de colisão frontal na malha administrada pelo DER/SP, de 2023. (AUTOR, 2024).

Acidentes com vítimas fatais

No desenvolvimento do mapa de calor da distribuição das vítimas fatais, pode-se observar concentrações de mortalidade por acidentes de trânsito, na malha estadual do DER/SP nas regiões de Campinas, São Paulo, Sorocaba, Ribeirão Preto, Bauru e São José do Rio Preto.

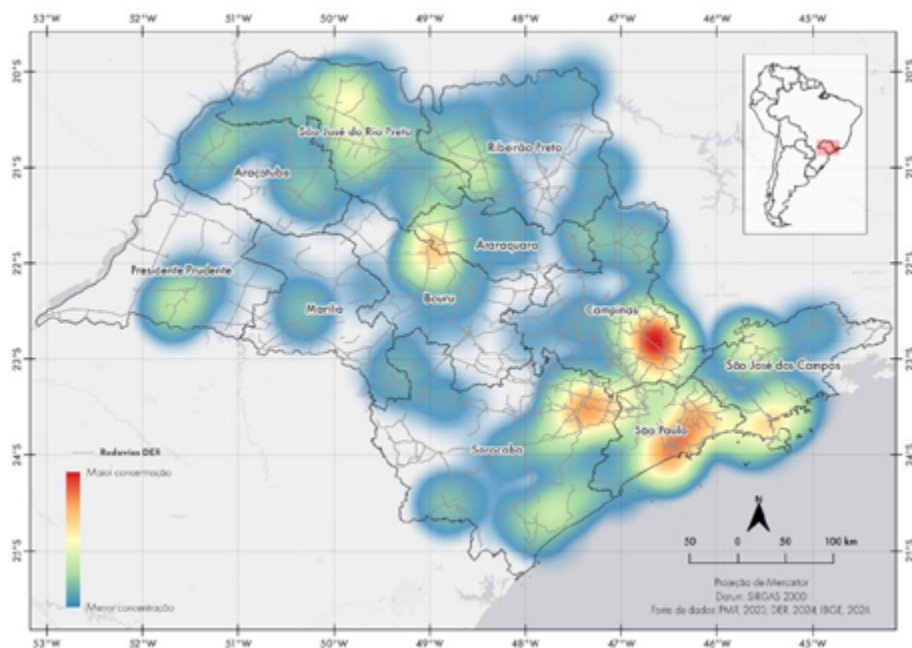


Figura 7. Heatmap de acidentes fatais na malha administrada pelo DER/SP, de 2023. (AUTOR, 2024).



DOI: 10.29327/1430212.49-84

ANÁLISE DE ACIDENTALIDADE NAS RODOVIAS SOB ADMINISTRAÇÃO
DO DER/SP UTILIZANDO MAPAS DE CALOR

Unidades Padrão de Severidade – UPS

Para se estabelecer um índice de criticidade, levando em consideração a severidade dos acidentes, o DER/SP utilizou o método numérico de Unidade Padrão de Severidade (UPS), de acordo com estudos internacionais e nacionais e aplicados pelo DER/SP e DNIT. Esta Unidade pondera os acidentes de acordo com a sua gravidade, com os seguintes pesos:

- • Acidentes sem vítimas (apenas danos materiais) – peso 1;
- • Acidentes com vítimas feridas – peso 5;
- • Acidentes com vítimas fatais – peso 13.

A equação que representa a UPS se dá através da equação (2):

$$UPS = (AC_{sem\ vítimas} \times 1) + (AC_{vítimas\ feridas} \times 5) + (AC_{vítimas\ fatais} \times 13) \quad (2)$$

No mapa a seguir, observa-se uma marcante concentração de pontos com as mais altas Unidades Padrão de Severidade (UPS) em rodovias nas proximidades do município de São Paulo, destacando o cenário abrangente das rodovias estaduais de São Paulo.



Figura 8. Mapa de UPS a cada 1km da malha sob administração do DER/SP, de 2023. (AUTOR, 2024).

DISCUSSÃO

A visualização de dados de acidentes de forma espacializada é fundamental para a tomada de decisões eficazes em relação à segurança viária:

Ao mapear os dados de acidentes, é possível identificar áreas geográficas específicas com uma alta incidência de acidentes, além de padrões e tendências. Tais procedimentos permitem que os responsáveis pela tomada de decisão em segurança viária concentrem seus esforços e recursos



Carolina Iris Brasil Mariano,
Rafael Grinberg Chasles, Fabiana Gurkas Brunoro,
José Luiz Fuzaro Rodrigues, Gean Kenid Sifronio Franco,
Vinicius do Prado Capanema, Bruna Donegá Alves & Anderson Barbosa Esteves

nessas áreas para implementar medidas preventivas direcionadas. Com uma compreensão clara de onde e como os acidentes ocorrem, os planejadores podem tomar decisões informadas sobre o projeto e a manutenção das rodovias, interseções e outros elementos da infraestrutura viária para minimizar os riscos de acidentalidade.

Importante salientar que o mapeamento possui algumas incertezas. Entre algumas das incertezas pode-se citar a que estabelece relação com os registros de acidentes. Na ocasião em que a Polícia Estadual Rodoviária, por não possuir equipamento com *Global Navigation Satellite System* (GNSS) para extrair as coordenadas exatas, realizando o registro a partir de uma estimativa da quilometragem da rodovia dos marcos quilométricos. Outro ponto de incerteza é a não uniformidade entre os marcos quilométricos. Estes marcos nem sempre respeitam o distanciamento de exatamente 1 quilômetro e via de regra, não corresponde a 1 quilômetro cartesiano (que foi a unidade de medida utilizada para as análises) ou elipsoidal. A base cartográfica da malha está em constante atualização e correção, porém ainda não se encontra consolidada. Portanto, o mapeamento dos acidentes e pontos críticos é uma aproximação espacial do ocorrido e não corresponde com exatidão a ocorrência do fenômeno.

Próximo Passo do DER/SP em Relação à Segurança Viária

Apesar da favorabilidade dos dados de acidentes em redução ao longo dos anos, alguns pontos necessitam de atenção quanto à ocorrência de fatalidades nas rodovias estaduais de São Paulo, em especial na malha do DER/SP, tratado neste artigo, são eles:

- O preocupante aumento das fatalidades envolvendo motocicletas, frota que cresce exponencialmente a cada ano, tem sido uma motivação para o DER/SP pensar em soluções favoráveis a esses usuários. Sabe-se que os motociclistas, por serem usuários vulneráveis, necessitam de potencial atenção, principalmente em rodovias, onde os limites de velocidade são maiores quando comparados às zonas urbanas.
- A tendência de acidentes dos tipos colisão frontal e atropelamentos, os mais fatais em vias. Importante lembrar que o Brasil integra a Década de Ação de Segurança no Trânsito lançada pela OMS (2021-2030) e também a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da ONU, que possuem metas de redução em 50% no número de óbitos e lesões graves até 2030.

Outra questão é que em 2018 lançou-se o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (PNATRANS), através da Lei nº 13.614 (11 de janeiro de 2018). O Plano é embasado em 6 pilares de ação com os temas-base: gestão da segurança no trânsito, vias seguras, segurança veicular, educação para o trânsito, atendimento à vítimas e normatização e fiscalização. A meta principal do PNATRANS é a redução pela metade dos índices de óbitos por grupo de habitantes e por grupo de veículos.

Diante de tais motivações, em 2024 o DER/SP lança o Plano de Segurança Viária (2024-2030) destinado à melhoria da infraestrutura viária, visando à redução dos índices de mortos por grupo de habitantes e por grupo de veículos. O plano contará com ações relacionadas, não só com a infraestrutura, mas também com educação no trânsito, inovação em segurança viária, adequação de rodovias existentes para o padrão 3-estrelas ou mais pela metodologia iRAP, tratamento de pontos críticos e áreas urbanas, além de ações voltadas para os usuários vulneráveis.



DOI: [10.29327/1430212.49-84](https://doi.org/10.29327/1430212.49-84)

ANÁLISE DE ACIDENTALIDADE NAS RODOVIAS SOB ADMINISTRAÇÃO DO DER/SP UTILIZANDO MAPAS DE CALOR

Estudos Futuros

Outras análises de tendências por meio de mapas estão sendo realizados na autarquia do DER/SP atualmente, tais como:

- Avaliação da influência e impacto na segurança viária da presença de escolas lindeiras às rodovias estaduais sob administração pública:

Sabe-se que a presença de crianças em rodovias, onde a velocidade de projeto pode vir a ser alta, pode acarretar acidentes fatais para estes usuários vulneráveis. Se faz necessária uma análise aprofundada sobre esse tipo de acidentalidade nas rodovias estaduais sob administração do DER/SP.

- Avaliação dos pontos críticos pela metodologia iRAP:

Outra análise que está sendo realizada é a de pontos críticos por meio não só da concentração de acidentes, mas também por avaliação de risco da infraestrutura, a partir da metodologia iRAP.

A metodologia iRAP é um método técnico-científico capaz de classificar por estrelas as rodovias quanto à segurança viária, onde 1-estrela refere-se a pior condição e 5-estrelas revela uma melhor condição para 4 tipos de usuários das vias (usuários de veículos, motociclistas, ciclistas e pedestres). O método também é capaz de traçar um plano de investimentos apropriado para reduzir as mortes e os ferimentos graves de maneira eficiente, norteando a priorização de recursos para a aplicação de contramedidas na infraestrutura viária.

O DER/SP está aplicando a metodologia iRAP na malha sob sua administração e poderá em breve ter um diagnóstico de classificações por estrelas sob a visão da segurança viária, e traçar planos a curto, médio e longo prazo de melhorias para as suas rodovias.

CONCLUSÃO

Com o objetivo de estabelecer o conceito de visão zero nas rodovias estaduais de São Paulo e eliminar rodovias de alto risco para os usuários, o DER/SP implementará o Plano de Segurança Viária, procurando aliar-se aos diversos atores envolvidos na gestão viária, implementando contramedidas de engenharia e estabelecendo metas factíveis até 2030.

A visualização espacial dos dados de acidentes permite monitorar o impacto das intervenções de segurança viária ao longo do tempo. Esta visualização espacial dos dados permite, ainda, avaliar a eficácia de medidas já implementadas e ajustar as estratégias conforme necessário para melhorar continuamente a segurança nas estradas.

A representação visual dos dados de acidentes facilita a comunicação de informações complexas sobre segurança viária para diferentes partes interessadas, incluindo autoridades, legisladores e os usuários das vias. Tais procedimentos ajudam a aumentar a conscientização sobre os riscos associados ao tráfego e promove o apoio às medidas de segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHILÉS J.P.; DELFINER P. GEOSTATISTICS: modeling spatial uncertainty. Nova York: John Wiley e Sons. 695p.,1999.

POLÍCIA MILITAR RODOVIÁRIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Dados de acidentes, 2023. Planilha Excel.



Carolina Iris Brasil Mariano,
Rafael Grinberg Chasles, Fabiana Gurkas Brunoro,
José Luiz Fuzaro Rodrigues, Gean Kenid Sifronio Franco,
Vinicius do Prado Capanema, Bruna Donegá Alves & Anderson Barbosa Esteves

SILVERMAN, B. W. Estimativa de densidade para estatística e análise de dados. Nova York: Chapman e Hall, 1986.



IDENTIFICAÇÃO DE TRECHO RODOVIÁRIO COM ALTO ÍNDICE DE ACIDENTES E PROPOSTA DE SOLUÇÕES – ESTUDO DE CASO

Victor Paiva¹ & Maria Rachel de Araújo Russo¹

RESUMO

No Brasil, o transporte rodoviário é responsável pela movimentação de 90% dos passageiros e mais de 60% das mercadorias. Apesar da importância, a infraestrutura rodoviária está longe da ideal. A frota de veículos vem aumentando e, como consequência, surgem trechos críticos onde os índices de acidentes aumentam devido a inconformidades nos projetos justificadas pela viabilidade econômica. A identificação desses trechos é importante, pois apresentam elevado índice de fatalidade e resultam em altos custos de operação, de vida e de hospitalização, contrariando sua justificativa econômica. O método é simples a partir de uma abordagem prática da avaliação de segurança viária por ferramentas acessíveis e permite o emprego de *softwares* e dados disponibilizados pelos órgãos competentes. Desse modo, este artigo apresenta as etapas para identificação de um trecho crítico através da taxa de severidade, análise e definição dos pontos indutores de acidentes através de imagens de satélite. As correções sugeridas na geometria viária podem adequar o segmento às normas vigentes, promovendo aumento de segurança e redução de acidentes.

PALAVRAS-CHAVE: trecho rodoviário crítico; pontos críticos; índice de acidentes; segurança viária; taxa de severidade.

ABSTRACT

In Brazil, road transport is responsible for the movement of 90% of passengers and more than 60% of goods. Despite its importance, the road infrastructure is far from ideal. The vehicle fleet has been increasing and, therefore, critical stretches arise where accident rates increase due to non-conformities in projects justified by economic viability. The identification of these sectors is important, as they have a high fatality rate and result in high operating, life and hospitalization costs, contradicting their economic justification. The method is simple, based on a practical approach to road safety assessment using accessible tools and allows the use of software and data made available by the competent organs. Therefore, this article presents the steps for identifying a critical section through the severity rate, analysis and definition of accident-inducing points using satellite images. The suggested corrections to the road geometry can adapt the segment to current regulations, promoting increased safety and reducing accidents.

KEY WORDS: critical road section; critical points; accident rate; road safety; severity rate.

¹ Universidade Federal de Itajubá, victor.gap@outlook.com; rachelrusso99@unifei.edu.br



1. INTRODUÇÃO

Acidentes de trânsito representam a segunda maior causa de mortes no Brasil, superada apenas pela violência interpessoal (GBD, 2016). De acordo com o NHTSA (2001), 61% das fatalidades ocorrem em rodovias, mesmo que o trânsito represente apenas 40% da quilometragem percorrida pelos veículos. Apesar de cerca de 50% dos sinistros serem causados por falhas humanas, um projeto que incorpore medidas de segurança pode reduzir o potencial de erro e suas consequências (DNIT, 2010).

Nesse sentido, nas últimas décadas surgiu o conceito de auditoria de segurança viária (ASV), uma técnica que visa identificar pontos propícios a acidentes, a fim de auxiliar os profissionais na avaliação da segurança nos projetos rodoviários (ASSUNÇÃO, 2015). A questão é que na maioria dos casos, especialmente no Brasil, essas auditorias não ocorrem, implicando na execução de projetos em desacordo com a segurança viária.

No planejamento e projeto de rodovias, a primeira decisão a ser tomada é a escolha da Classe e o nível de serviço. A segunda é a seleção dos critérios de projeto. Para muitos dos elementos do projeto há um intervalo de valores a serem adotados, variando entre níveis mínimo e máximo (DNIT, 2010). Mas, por questões econômicas, adotam-se valores mínimos que podem suprir as necessidades da via para a situação atual, mas à medida que o tempo passa e o tráfego se intensifica, deixa de oferecer a qualidade inicial, provocando queda de nível de serviço e aumento de conflitos entre veículos, resultando em trechos com elevado potencial de acidentes.

Parte-se da premissa que o elevado índice de sinistros em um determinado trecho está associado às suas características físicas, sendo possível de serem corrigidas. Para a análise, questões básicas são consideradas, como a existência de superlargura nas curvas, raios mínimos, curvas horizontais reversas e/ou curvas verticais com raios discrepantes, entre outros aspectos não menos importantes. Este trabalho tem por objetivo analisar um trecho de rodovia em operação para apontar as possíveis relações entre suas características físicas e o índice de acidentes, com base nos fatores intensificadores apontados no referencial teórico, e apresentar alternativas de intervenção para maximizar a segurança.

2. MÉTODO

Este trabalho é de natureza descritiva, tendo uma abordagem quali-quantitativa que se justifica pela necessidade de caracterização do trecho a ser estudado. A primeira etapa é a definição dos pontos críticos no trecho de rodovia escolhido, feita a partir do conceito de taxa de severidade associado a uma revisão bibliográfica e análise de documentos com dados estatísticos de sinistros de trânsito por quilômetro.

Com o diagnóstico, é possível caracterizar o trecho através do *Google Earth*, que permite a manipulação de imagens de satélite e definição do traçado, além de fornecer dados sobre relevo e topografia. A localização do trecho pode ser feita pela plataforma VGEO, Visualizador de Informações Geográficas do DNIT. Trata-se de uma aplicação em constante atualização com a finalidade de atender às demandas por informações georreferenciadas de forma interativa (DNIT, 2019). Essa ferramenta possui uma função chamada “Segmentador” que destaca a parte de uma rodovia quando informados os quilômetros inicial e final. É possível situar o trecho no *Google Earth Pro* utilizando a ferramenta “Caminho”. A partir do caminho criado, pode-se extrair, diretamente, dados de perfil e raios de curvas usando as ferramentas de medição.



DOI: 10.29327/1430212.49-85

IDENTIFICAÇÃO DE TRECHO RODVIÁRIO COM ALTO ÍNDICE DE ACIDENTES E PROPOSTA DE SOLUÇÕES
ESTUDO DE CASO

Por fim, com base nos conceitos apresentados por Pimenta *et al.* (2021), DNIT e AASHTO (2013), associados às informações coletadas, é possível analisar o trecho apontando fatores indutores de acidentes e possíveis soluções alternativas para correções.

Conhecimento de um Trecho Crítico

A primeira etapa é a definição dos pontos críticos no trecho de rodovia. Analisando a distribuição dos acidentes no espaço, diversos critérios podem ser empregados na análise desses locais (interseções, trechos de vias, áreas ou locais com características similares). Alguns dos parâmetros normalmente usados são o número de acidentes, índice de severidade e custo dos acidentes. O emprego do número total de sinistros, sem diferenciação da gravidade, significa considerar equivalentes os acidentes sem vítimas, com vítimas e com vítimas fatais. Desse modo, seria possível que um ponto com dez acidentes sem vítimas fosse considerado mais crítico que um outro com nove vítimas fatais. Por conta dessa distorção, esse critério não expressa da melhor forma a dimensão da acidentalidade viária de um local (FERRAZ *et al.*, 2012).

O mais indicado é o emprego do índice de severidade, que pode ser obtido atribuindo-se pesos aos acidentes, como expresso na Equação 1:

$$S = 1 \times D + P_V \times V + P_F \times F \quad (1)$$

em que S : índice de severidade;

D : número de acidentes sem vítimas;

V : número de acidentes com vítimas não fatais;

F : número de acidentes com vítimas fatais;

P_V : peso atribuído a acidentes com vítimas não fatais;

P_F : peso atribuído a acidentes com vítimas fatais.

Apesar de mais adequado, esse critério apresenta uma dificuldade de aplicação que se refere à definição dos pesos. Uma maneira de defini-los é a partir dos custos unitários associados a cada tipo de acidente. No Brasil, esses custos podem ser obtidos através do IPEA (2015). Com base nesses valores, obtém-se a Equação 2:

$$S = 1 \times D + 4 \times V + 28 \times F \quad (2)$$

Porém, mais uma vez, existe um problema de inconsistência, já que ela resulta em pesos muito maiores por conta da grande diferença entre esses custos unitários, ao mesmo tempo em que existe uma certa aleatoriedade na diferença entre um acidente com vítimas fatais e não fatais, por exemplo. No Brasil, um estudo do DENATRAN preconiza os seguintes pesos e respectiva expressão (Equação 3) para determinação do índice de severidade (FERRAZ *et al.*, 2012):

$$S = 1 \times D + 5 \times V + 13 \times F \quad (3)$$

Esses valores foram também obtidos com base nos custos por acidente à época em que o estudo foi realizado, por isso, são discrepantes dos valores fornecidos pelo IPEA que são mais próximos da realidade atual. Mesmo desatualizado, como a diferença entre os pesos dos acidentes com vítimas fatais e não fatais é menor, levando-se em conta as considerações supracitadas, esses pesos expressam melhor a dimensão da acidentalidade em termos de risco.

A unidade do índice de severidade é definida pelo DENATRAN como UPS (Unidade Padrão de Severidade). Também pode ser utilizado o conceito de taxa de severidade obtida mediante o quociente do índice de severidade pelo volume de tráfego (UPS/veíc.), extensão da via (UPS/km) ou quantidade de transporte (UPS/veíc.km ou UPS/pass.km) (PARE, 2002).

Sendo o índice de severidade diretamente proporcional ao número total de sinistros, há uma tendência de se dirigir o foco para locais onde há um tráfego maior de veículos, enquanto na taxa de



severidade todos os pontos são comparados de igual para igual, possibilitando encontrar locais onde efetivamente há algo incomum que leva aos acidentes.

Diante dessa problemática, inúmeros fatores de risco podem ser identificados, como defeitos na superfície de rolamento, projeto geométrico inadequado, sinalização deficiente, interseções inadequadas, problemas na lateral da via, falta de iluminação etc. Como o trecho é analisado somente por imagens aéreas, é dada ênfase nas diretrizes abordadas por Pimenta *et al.* (2021) e pelo DNIT (2010):

a) Inconformidades no projeto geométrico:

- Existência de curva de pequeno raio após longo trecho em tangente e/ou curvas suaves;
- Sequência de curvas de pequeno raio;
- Trechos com distância de visibilidade de frenagem ou ultrapassagem incompatível com a velocidade usual na via;
- Superelevação e/ou superlargura inadequada nas curvas;
- Falta de legibilidade (o traçado da via não é suficientemente explícito para os usuários);
- Uso de raios mínimos ou próximos dos mínimos;
- Existência de curvas compostas;
- Curvas consecutivas de mesmo sentido com espaçamento inferior a 400 m.

b) Interseções inadequadas:

- Visibilidade ruim para aqueles que entram em um cruzamento com rodovia preferencial, devido à geometria inadequada ou existência de elementos próximos à via (construções, árvores, vegetação alta, postes, propaganda comercial, abrigos de ônibus etc.);
- Entrada e saída direta (sem pista de aceleração/desaceleração) nas vias de alta velocidade;
- Condições favoráveis ao desenvolvimento de velocidade excessiva nas aproximações;
- Sinalização deficiente.

c) Problemas na lateral da via

- Falta de acostamento;
- Presença de obstáculos próximos à pista.

Pimenta *et al.* (2021) destacam que, no Brasil, onde o modo rodoviário é responsável pela maior parte dos transportes e, sendo o país carente em infraestrutura, o volume de projetos justificados economicamente é superior à sua capacidade de funcionamento, levando a projetos menos prioritários e, em alguns casos, aqueles cujo traçado e/ou pavimento não atendem aos critérios de segurança e conforto. Adicionalmente, ainda hoje, muitas das rodovias não concessionadas estão em estado ruim ou péssimo de conservação.

3. RESULTADOS E ANÁLISE

Definição do Trecho

A partir de dados obtidos em Vias Seguras (2010), foi feita uma comparação entre segmentos de diversas rodovias federais, abordando trechos localizados em Minas Gerais e São Paulo. Os trechos em destaque caracterizam pontos com concentração anormal de acidentes, assim, esta é a primeira seleção feita. Os dados mais recentes se referem aos anos de 2018 e 2020, dependendo do trecho em questão. Foram utilizadas imagens de satélite registradas naqueles anos para analisar os segmentos, além de comparação com imagens mais atuais para verificar se os problemas foram corrigidos.

Seguindo a metodologia do Programa de Redução da Morbimortalidade por Acidentes de Trânsito (Secretaria de Políticas de Saúde/MS, 2002), apresentam-se na Tabela 1 os quantitativos de



DOI: 10.29327/1430212.49-85

IDENTIFICAÇÃO DE TRECHO RODVIÁRIO COM ALTO ÍNDICE DE ACIDENTES E PROPOSTA DE SOLUÇÕES
ESTUDO DE CASO

sinistros sem vítimas, com vítimas não fatais e com vítimas fatais, e o índice de severidade de cada trecho. Para a obtenção desse índice foram utilizados os pesos sugeridos: 1 para acidentes sem vítimas, 5 para acidentes com vítimas não fatais e 13 para acidentes com vítimas fatais.

Os índices de severidade calculados pela Equação 3 permitem a obtenção da taxa de severidade, dividindo-os pela quantidade de veículos que passa pelo segmento (VDT - volume diário total ou VDMA - volume diário médio anual) em um determinado período. Como esses valores podem ser muito diferentes em diversos pontos de uma rodovia, é correto usar os valores referentes especificamente ao trecho analisado, porém, não foram encontrados registros de contagem de tráfego em todos os pontos na data correspondente. Sendo assim, partindo do princípio de que há uma manutenção na proporcionalidade do tráfego, foi utilizado o Plano Nacional de Contagem de Tráfego feito pelo DNIT (2017).

Tabela 1: Índice de severidade (próprios autores).

Rodovia	Trecho	Ano	Acidentes sem vítimas	Acidentes com vítimas não fatais	Acidentes com vítimas fatais	Índice de Severidade
BR 381-MG	km 400 a 409	2008	103	67	17	659
BR 381-MG	km 420 a 429	2008	139	88	11	722
BR 262-MG	km 380 a 389	2008	67	47	4	354
BR 116-SP	km 200 a 209	2010	138	48	11	521
BR 116-SP	km 210 a 219	2010	435	212	15	1690
BR 116-SP	km 269 a 279	2010	276	149	17	1242
BR 116-SP	km 280 a 289	2010	150	73	9	632
BR 116-SP	km 540 a 549	2008	198	41	2	429
BR 381-SP	km 080 a 089	2010	155	101	9	777

Tabela 2: Volumes diários médios anuais (VDMA) em ambos os sentidos (DNIT, 2017).

km inicial	km final	Extensão do trecho	VDMA
398,5	429,1	30,6	17905
398,5	429,1	30,6	17905
382,7	406,5	23,8	2628
199,6	217,3	17,7	67507
199,6	217,3	17,7	67507
268,9	284,0	15,1	16242
284,0	288,0	4,0	25462
476,5	551,2	74,7	21650
83,9	90,4	6,5	65187

Os valores escolhidos para cada trecho foram os VDMA equivalentes em uma dada seção da via, determinados a partir de observações no período de um ano (ANTT, 2003). Esses dados estão expressos na Tabela 2, e as taxas de severidade calculadas estão expressas na Tabela 3.

**Tabela 3:** Taxas de severidade (próprios autores).

Rodovia	Trecho	Índice de Severidade	VDMA	Taxa de Severidade
BR 381-MG	km 400 a 409	659	17905	0,036805
BR 381-MG	km 420 a 429	722	17905	0,040324
BR 262-MG	km 380 a 389	354	2628	0,134703
BR 116-SP	km 200 a 209	521	67507	0,007718
BR 116-SP	km 210 a 219	1690	67507	0,025034
BR 116-SP	km 269 a 279	1242	16242	0,076468
BR 116-SP	km 280 a 289	632	25462	0,024821
BR 116-SP	km 540 a 549	429	21650	0,019815
BR 381-SP	km 080 a 089	777	65187	0,01192

Caracterização do Trecho

O trecho da BR 262-MG (km 380 a 389) se destaca, apresentando uma taxa de severidade 76% maior que a segunda maior taxa, referente ao trecho da BR 116-SP (km 269 a 279). Desse modo, o trecho foi escolhido para o estudo, ilustrado na Figura 1.

**Figura 1:** Trecho em estudo da BR 262 (Google Earth Pro).

No período em que foram registrados os dados o trecho conta com pista dupla convencional. Nesse tipo de via pode haver cruzamentos ou semáforos ocasionais, desde que espaçados para manter condições de fluxo contínuo na maior parte do trecho, em geral de três quilômetros (ROESS *et al.*, 2010).

- Rise & Fall (R&F): parâmetro que descreve a geometria vertical, é definido como o comprimento de aclives e declives, em m/km. Valores abaixo de 20 m/km estão associados a terrenos planos, enquanto um valor maior ou igual a 80 m/km indica um terreno montanhoso. Valores entre esses dois parâmetros caracterizam terrenos ondulados.



DOI: 10.29327/1430212.49-85

IDENTIFICAÇÃO DE TRECHO RODVIÁRIO COM ALTO ÍNDICE DE ACIDENTES E PROPOSTA DE SOLUÇÕES
ESTUDO DE CASO

Figura 2: Perfil longitudinal (Google Earth Pro).

Por meio do perfil longitudinal da via, mostrado na Figura 2, foram registrados 281 m de aclives e 323 m de declives, totalizando 575 m de variação vertical no segmento. Dividindo pela distância de 9,2 km, tem-se R&F de 62,5 m/km, caracterizando o trecho como ondulado.

- Curvatura (C): parâmetro que descreve a geometria horizontal, é definida como a variação, em graus, por quilômetro de via. Valores inferiores a 100 °/km estão associados a estradas majoritariamente retilíneas, enquanto um valor de 500 °/km representa uma via sinuosa. Para obter a curvatura do trecho, é ideal calculá-la de maneira direta a partir de uma trilha registrada por GPS que contém, a determinados intervalos de tempo, o azimute em relação à posição do veículo. A curvatura é a relação entre a variação absoluta total dos azimutes e a extensão do trecho. Neste estudo, foi adotada uma simplificação, obtendo a curvatura do segmento a partir dos ângulos entre as tangentes das curvas. Foi obtido um total de 1016 graus no trecho de 9,2 km ($C = 110$ °/km), classificando o trecho como mais próximo de uma via retilínea.

DNIT (2016) apresenta o número de acidentes por quilômetro e os tipos de acidentes para as rodovias federais, subdividindo-os em: atropelamento de animal, atropelamento de pessoa, capotamento, colisão com obstáculo fixo, colisão frontal, colisão lateral, colisão transversal, colisão traseira, engavetamento, saída de pista, tombamento etc. Como os dados que definiram a escolha do trecho são referentes a 2010, e as imagens de satélite são de 2009 e 2007, foi feita uma análise dos dados de sinistros considerando os anos de 2007, 2008, 2009 e 2010. A primeira análise se refere ao número de acidentes por km.

Com a representação gráfica da Figura 3, fica nítido que os quilômetros iniciais são os que concentram a maior parte dos sinistros, podendo-se destacar os quilômetros 380 e 381. Outra análise feita é quanto aos tipos de sinistros mais frequentes (Figura 4).

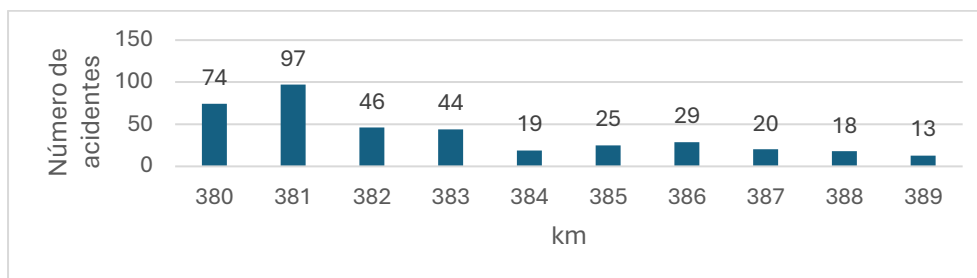


Figura 3: Número de acidentes por km (próprios autores).

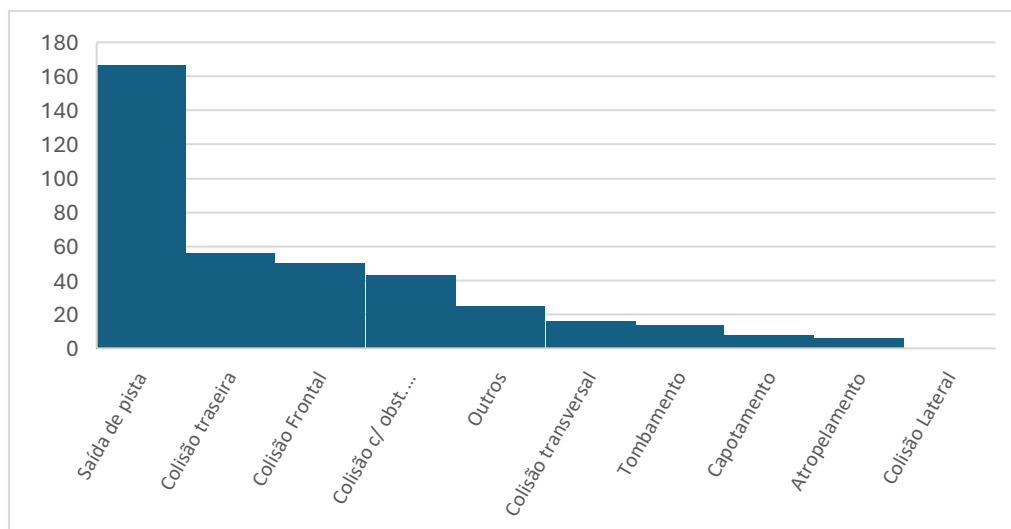


Figura 4: Quantitativo de acidentes por tipo (próprios autores).

O tipo de acidente mais frequente é “saída de pista”, representando mais de 40% do total de acidentes registrados no trecho nos quatros anos de análise.

Análise do Trecho

Inconformidades no projeto geométrico

Antes de tratar dos pontos críticos é importante fazer uma análise geral do traçado. No trecho de 9,2 km há 281 m de aclives e 323 m de declives, totalizando 575 m de variação vertical. Quanto às inclinações, o perfil gerado registrou valores máximos de 17,8% e -15,1%, caracterizando um trecho muito íngreme. Quanto às variações no traçado, existem 17 curvas horizontais e 4 verticais que podem ser vistas nas Figuras 2 e 5.



Figura 5: Geometria do trecho (próprios autores).

O trecho conta com pista simples, verificada nas imagens de satélite, e com VDM de 2628 veículos (Tabela 2). O trecho é classificado como ondulado, Classe 1B e velocidade de projeto de 80 km/h. Segundo o DNIT (2010), para essa classificação tem-se um raio mínimo de 200 m.



DOI: 10.29327/1430212.49-85

IDENTIFICAÇÃO DE TRECHO RODVIÁRIO COM ALTO ÍNDICE DE ACIDENTES E PROPOSTA DE SOLUÇÕES
ESTUDO DE CASO

Por meio do *Google Earth Pro* foi possível quantificar o raio de cada uma das curvas, mostrados na Tabela 4. Das 17 curvas, 6 estão irregulares, segundo o DNIT. Foi desconsiderada nesta contagem a curva 3 que, por ser composta, é um caso à parte e se trata de uma inconformidade, conforme Pimenta *et al.* (2021).

Tabela 4: Raios das curvas (próprios autores).

Curva	Raio (m)	
1	96	
2	175	
3*	105	175
4	105	
5	260	
6	110	
7	220	
8	310	
9	320	
10	225	
11	440	
12	150	
13	275	
14	190	
15	580	
16	265	
17	205	

*Curva composta

Outra inconformidade identificada é a existência de curva de pequeno raio após longo trecho em tangente ou após várias curvas suaves. Há cinco ocorrências, sendo na primeira, uma tangente de 500 m seguida por curva de raio 105 m; na segunda, tangente de 500 m seguida por curva de raio 110 m; na terceira, tangente de 1400 m seguida por curva de raio 225 m; na quarta, tangente de 500 m seguida por curva de raio 150 m; na quinta, tangente de 750 m seguida por curva de raio 190 m. Esses pontos estão mostrados na Figura 6.

**Figura 6:** Tangentes seguidas de curvas de pequeno raio (próprios autores).



Nos dois quilômetros iniciais há a ocorrência de uma sequência de curvas de pequeno raio, outro fator indutor de acidentes. Nesse segmento, a sequência é de quatro curvas com raios de 96 m, 175 m, 105 m/175 m (curva composta) e 105 m, em ordem de ocorrência. Existem, também, duas curvas consecutivas de mesmo sentido, com espaçamento de 200 m, sendo assim, inferior aos 400 m recomendados por Pimenta *et al.* (2021).

Interseções inadequadas

O trecho apresenta inconformidades neste quesito, sendo a de maior ocorrência a entrada e saída direta (sem pista de aceleração/desaceleração). Isso induz a velocidades mais altas, intensificando a gravidade. Na Figura 7 pode ser visto um desses locais onde existem três acessos diretos à via.



Figura 7: Acessos diretos de veículos à via (próprios autores).

Proposta de Soluções e Comparação com o Trecho Atual

A maioria das inconformidades tem solução simples, pois se estão fora de limites sugeridos pelo DNIT, devem ser adequadas a esses limites. Isso é válido para as diversas curvas com raio mínimo inferior a 200 m. Para o caso da curva composta, o ideal é transformá-la em uma única curva com raio superior a 200 m.

Com essas adequações outros problemas são resolvidos, como ocorrências de curvas de pequeno raio após longo trecho de tangente e após sequência de curvas de pequeno raio. Para o problema identificado onde existem duas curvas de mesmo sentido em um intervalo inferior a 400 m, o mais adequado é transformar as duas curvas em uma única, com raio maior. Outra adequação importante no trecho se refere aos acessos de veículos à estrada. A solução adequada é a construção de uma faixa contígua de aceleração (*taper*) ou criação de um anel viário, dependendo do fluxo, propiciando um trecho de via mais seguro.



DOI: [10.29327/1430212.49-85](https://doi.org/10.29327/1430212.49-85)

IDENTIFICAÇÃO DE TRECHO RODVIÁRIO COM ALTO ÍNDICE DE ACIDENTES E PROPOSTA DE SOLUÇÕES ESTUDO DE CASO



Figura 8: Aumento do raio da primeira curva (próprios autores).



Figura 9: Interseção em 2009 (próprios autores).



Figura 10: Interseção em 2019 (próprios autores).

Comparando com as imagens atuais, verifica-se que algumas soluções aqui propostas foram implantadas. A primeira (Figura 8) foi o aumento do raio da curva, que pode ser identificado pela sobreposição do traçado antigo na imagem atual, e a segunda, a criação de um anel viário para acesso ao trecho. O mesmo trecho pode ser visto nas Figuras 9 e 10.

Algumas curvas com raios inadequados foram mantidas, mas, de modo geral, o trecho foi duplicado e, atualmente, tem acostamento e canteiro central dividindo os sentidos de tráfego.



4. CONCLUSÃO

Normas e manuais de implantação de rodovias são desenvolvidos com o propósito de manter a segurança dos usuários, evitando sinistros de trânsito e a fatalidade em caso de ocorrência. O desrespeito às normas implica em redução na segurança e, conseqüentemente, no aumento do número de acidentes. Isso ficou claro no trecho estudado, onde existe uma série de inconformidades em relação às normas e sugestões do DNIT (2010).

A viabilidade econômica é a justificativa mais comum para a aprovação de projetos cujo traçado e/ou pavimento não atendem aos critérios de segurança, porém, quando se considera que o transporte rodoviário é praticamente a única opção para passageiros e cargas, essa condição pode se tornar insustentável. A longo prazo, os custos decorrentes dos acidentes induzidos por economia no projeto encarecem os custos de operação e manutenção, exigindo interferências e modificações de traçado, como foi possível identificar na comparação cronológica do trecho. Vale ressaltar que, para além das justificativas econômicas, a segurança de uma via deve estar em primeiro lugar.

A proposta deste estudo foi analisar pontos críticos de um trecho rodoviário que apresenta elevado número de acidentes, identificar as causas e propor soluções. Isso foi feito de maneira simples, porém eficaz, mostrando que é possível ser feito por um profissional de engenharia civil e sem envolver grandes custos, já que as ferramentas e *softwares* utilizados são de acesso gratuito. Desse modo, o procedimento realizado pode ser repetido para outros trechos rodoviários, o que permite a seleção de trechos prioritários e a identificação de inconformidades para avaliação de necessidades de adequação.

No trecho selecionado ficou demonstrada a necessidade de melhorias no projeto geométrico, seja pela imprescindível atualização de manuais e normas, ou pela aplicação correta e prioritária das medidas de segurança viária.

Como sugestão de continuação do estudo, sugere-se ampliar o trabalho por meio de pesquisa de soluções para trechos críticos que sejam de baixo custo, implantação de curto prazo, e com adequado fator de redução de acidentes, mitigando previsíveis causas de sinistros nesses trechos críticos, cujas soluções se integram à revisão do projeto geométrico numa visão sistêmica de segurança viária. Adicionalmente, sugere-se explorar modelos de regressão sob condições geométricas e operacionais, além de explorar os impactos econômicos das soluções propostas com uma análise de custo-benefício.

REFERÊNCIAS

- AASHTO (2013) A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO, Washington D.C.
- ANTT (2003) Concessões de rodovias federais - Relatório anual. Agência Nacional de Transportes Terrestres.
- ASSUNÇÃO, L. T. (2015) Instrumento de Auditoria e Segurança Viária para Projetos Rodoviários Brasileiros. Dissertação (Mestrado) - Unb. Brasília, p. 353.
- DNIT (2010) Manual de Projeto e Práticas Operacionais para Segurança nas Rodovias. 1ª Ed. Rio de Janeiro, 280 p.
- DNIT (2016) Estatísticas de Acidentes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2016. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/estatisticas-de-acidentes>>.
- DNIT (2017) Plano Nacional de Contagem de Tráfego. PNCT. Disponível em: <<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Modelagem>>.
- DNIT (2019) Manual de instrução VGEO. Diretoria de planejamento e pesquisa. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/planejamento-e-pesquisa/dnit-geo/vgeo/manual_vgeo.pdf>.



DOI: [10.29327/1430212.49-85](https://doi.org/10.29327/1430212.49-85)

IDENTIFICAÇÃO DE TRECHO RODOVIÁRIO COM ALTO ÍNDICE DE ACIDENTES E PROPOSTA DE SOLUÇÕES
ESTUDO DE CASO

FERRAZ, C. et al. (2012) Segurança Viária. 1ª Ed. São Carlos: Suprema.

GBD (2016) Health Data. Global Burden of Disease.

IPEA (2015) Estimativa dos custos dos acidentes de trânsito no Brasil com base na atualização simplificada das pesquisas anteriores do Ipea. Brasília, p. 20.

NHTSA (2001) Research Data. National Highway Traffic Safety Administration. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov/research-data>.

PARE (2002) Programa de Redução dos Acidentes de Trânsito. Ministério dos Transportes.

PIMENTA, C. R. T. et al. (2021) Projeto Geométrico de Rodovias. São Paulo: Elsevier Editora.

ROESS, R. P.; PRASSAS, E. S.; MCSHANE, W. R. (2010) Traffic Engineering. 4ª Ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.

SECRETARIA DE POLÍTICAS DE SAÚDE/MS (2002). Programa de Redução da Morbimortalidade por Acidentes de Trânsito. Projeto Promoção Saúde. Revista Saúde Pública 2002; 36(1):114-7.

VIAS SEGURAS (2010) Por vias seguras. Disponível em: <http://vias-seguras.com/>.

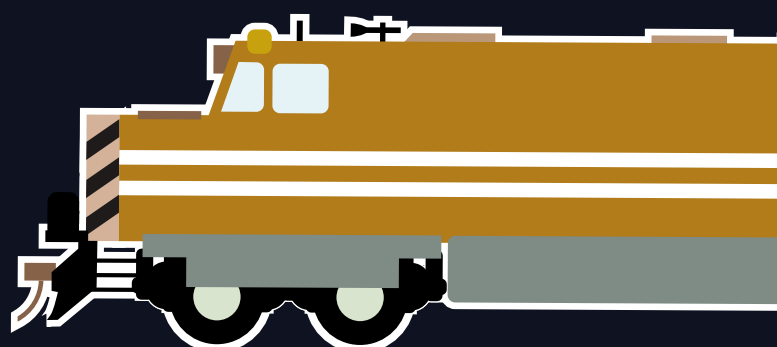


26° Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br



ABDER



**TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO,
RESTAURAÇÃO E
CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS**

PROGRAMAÇÃO
TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS E ESTUDOS DE CASOS DE OBRAS
Quarta-feira, 21 de agosto

SALA PIRAMBU		
TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO, RESTAURAÇÃO E CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS (ST07)		
⌚ 09:00	TT330	METODOLOGIA INTEGRADA PARA IMPUTAÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS RODOVIÁRIOS: COMBINAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO
⌚ 09:20	EC622	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MANUTENÇÃO DO TRECHO DA BR 101/NORTE NO ESTADO DE SERGIPE EMPREGANDO O ÍNDICE DE QUALIDADE DA MANUTENÇÃO (IQM): ESTUDO DE CASO
⌚ 09:40	EC362	PROGRAMA CONSERVA PRO: NOVAS ABORDAGENS DOS CONTRATOS DE MANUTENÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA DO DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS – DER/MG
⌚ 10:20	TT954	MELHORIAS SUPERFICIAIS EM ESTRADAS DE TERRA
⌚ 10:40	TT162	INFLUÊNCIA DAS CHUVAS NA IMPRODUTIVIDADE DE OBRAS DE TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO NA CIDADE DE ARACAJU/SE
⌚ 11:00	TT606	GLASS FIBRE GRID REINFORCED BITUMINOUS PAVEMENTS – FIELD STUDY
⌚ 11:40	TT561	CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADOS EM PAVIMENTAÇÃO DE VIA URBANA EM CIDADE NO INTERIOR DO CEARÁ
⌚ 12:20	TT833	INOVADORA VERSÃO DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO IMPREGNADO COM ASFALTO COMO CAMADA INTERMEDIÁRIA IMPERMEÁVEL E REDUTORA DA REFLEXÃO DAS TRINCAS
⌚ 09:00	EC617	ADEQUAÇÃO DA NORMA BRASILEIRA PRO-011 EM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS
⌚ 09:20	EC696	REMODELAGEM E ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS DO DNIT (SGP-DNIT)
⌚ 09:40	EC313	PROPOSTA DE PARÂMETROS DE PAVIMENTAÇÃO PARA RODOVIAS FEDERAIS CONCEDIDAS: ESTUDO E FUDAMENTAÇÃO
⌚ 10:20	EC485	MACROSSIMULAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE ESTIMATIVA DE VMDA NA MALHA RODOVIÁRIA DE MINAS GERAIS



METODOLOGIA INTEGRADA PARA IMPUTAÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS RODOVIÁRIOS: COMBINAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO

Diego Vieira de Souza¹; Mariana Gonçalves da Silva²; Brunna Mikaelli Pinho da Silva³; Francisco Junior Peixoto Dantas¹; Antonio Junior Alves Ribeiro³ & Suelly Helena de Araújo Barroso²

RESUMO

A previsão de dados geotécnicos tem sido essencial para a execução de projetos rodoviários e manutenção de rodovias, reduzindo custos e melhorando a sua qualidade. Inserindo técnicas estatísticas é possível prever as condições de pavimentação e ensaios do solo de maneira eficaz. Desse modo, o objetivo deste estudo é realizar a imputação de dados correlacionados às variáveis fundamentais no banco de dados oriundo de 47 projetos rodoviários do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e 10 projetos da Secretaria de Obras Públicas do Ceará (SOP/CE), onde o mesmo possui aproximadamente 25% das linhas com dados faltantes. Sendo necessário o preenchimento dessas lacunas para não descartar esses dados tão importantes. Para tanto, utilizou-se da imputação de dados única separadamente para quatro variáveis do banco de dados, nas quais tinham maior porcentagem e importância para o estudo da rodovia. Realizou-se a aplicação de modelos de previsão e regressão, totalizando o uso de 15 modelos comparando-os e escolhendo os de melhores resultados, onde foram aplicados para a imputação de dados. Os modelos empregados foram: Regressão linear, Regressão de Vetores de Suporte (RVS), Rede Neural Artificial (RNA), Árvore de decisão, Floresta Aleatória, *XGBoost* e os modelos otimizados para Árvore de Decisão, Floresta Aleatória, *XGBoost* com três técnicas de otimização. Após aplicado, o método foi comparado às técnicas de imputações de dados mais utilizadas atualmente, onde obteve resultados favoráveis para com a imputação de valores de dados faltantes possuindo precisão superior para a maioria das colunas propostas.

PALAVRAS-CHAVE: Dados geotécnicos; Imputação de dados; Dados faltantes; Rodovias.

ABSTRACT

The prediction of geotechnical data has been essential for the execution of road projects and highway maintenance, reducing costs and improving quality. By incorporating statistical techniques, it is possible to effectively predict pavement conditions and soil tests. Thus, the objective of this study is to impute data correlated to the fundamental variables in the database derived from 47 road projects of the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) and 10 projects from the Ceará Public Works Department (SOP/CE), where approximately 25% of the lines have missing data. Filling these gaps is necessary to avoid discarding such important data. To this end, single data imputation was used separately for four variables in the database, which had the highest percentages and importance for the highway study. Prediction and regression models were applied, totaling the use of 15 models, comparing them and selecting the ones with the best results, which were then applied for data imputation. The models used were: Linear Regression, Support Vector Regression (SVR), Artificial Neural Network (ANN), Decision Tree, Random Forest, XGBoost, and optimized models for Decision Tree, Random Forest, and XGBoost with three optimization techniques. After application, the method was compared to the most currently used data imputation techniques, obtaining favorable results for imputing missing data values, with superior accuracy for most of the proposed columns.

KEYWORDS: Geotechnical data; Data imputation; Missing data; Highways.

¹ Universidade Federal do Cariri, e-mail: dvsdiegovieira@gmail.com; junior.peixoto@aluno.ufca.edu.br

² Universidade Federal do Ceará, e-mail: marigoncalves241@gmail.com; suelly@det.ufc.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, e-mail: brunna.mikaelli@gmail.com; ajar.junior@gmail.com



DOI: [10.29327/1430212.49-37](https://doi.org/10.29327/1430212.49-37)

METODOLOGIA INTEGRADA PARA IMPUTAÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS RODVIÁRIOS:
COMBINAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO

INTRODUÇÃO

Com a finalidade de garantir a concepção eficaz de projetos rodoviários, é necessário que se tenha conhecimento acerca das diversas variáveis físicas provenientes do meio no qual serão executados, principalmente características relacionadas à topografia e a geotecnia (GUILHERME et al., 2020). Com intuito de obter essas informações com maior praticidade e com o advento das técnicas de ciência dos dados e aprendizado de máquina tem-se percebido uma crescente utilização dessas metodologias para a previsão de dados geotécnicos de rodovias, podendo se tornar uma prática importante para evitar o retrabalho e desperdício de recursos já empregados em projeto, garantindo assim qualidade e economicidade aos futuros projetos rodoviários.

Utilizando tais técnicas, é possível prever uma variedade de parâmetros geotécnicos, incluindo a densidade do solo, a umidade ótima e o índice de suporte califórnia (ISC). Essas predições são realizadas através de informações provindas de ensaios básicos, como a granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade e compactação, de modo a estimar parâmetros mais complexos (SOUZA, RIBEIRO & SILVA, 2021). Essas estimativas permitem que os profissionais identifiquem áreas de potencial instabilidade, projetem estruturas de pavimentação adequadas e implementem medidas preventivas para mitigar os riscos de deslizamentos de terra, subsidência e outros problemas geotécnicos.

Ribeiro Silva e Barroso (2018) acrescentam que, o mapeamento de informações geotécnicas confiáveis podem ajudar a reduzir custos e aumentar a qualidade na elaboração e execução de projetos viários. Além disso, é possível preencher lacunas significativas, reduzindo a necessidade de novos ensaios caros e demorados, no caso de trechos rodoviários que não contenham informações. Ao extrapolar dados limitados de ensaios existentes para áreas semelhantes, esses métodos estatísticos podem fornecer estimativas confiáveis para uma variedade de parâmetros geotécnicos. Esse enfoque não apenas reduz os custos associados à realização de novos ensaios, mas também oferece uma abordagem eficaz para médias e pequenas obras rodoviárias, onde os recursos podem ser mais limitados.

De acordo com Soncim e Junior (2012), os modelos de previsão de dados geotécnicos integram um Sistema de Gerenciamento de Pavimentos (SGP), sendo empregados tanto em escala de rede quanto no planejamento, estimativa das necessidades globais de manutenção e reabilitação. Soncim, Junior e Campos (2014), explicam que, a função de um SGP é melhorar a eficiência das decisões e aumentar suas possibilidades, avaliar as consequências das decisões tomadas, facilitar a coordenação de atividades dentro de um órgão rodoviário. Se tornando assim, informações indispensáveis para o auxílio dos profissionais da área.

Na atualidade, não há como negar o crescimento exponencial dos dados disponíveis sobre os mais diversos assuntos permeando todos os aspectos das nossas vidas. Porém, mesmo tendo uma quantidade tão grande de informações, ainda enfrentamos um desafio recorrente em alguns conjuntos de dados: a presença de dados faltantes. Essa lacuna de dados (*missing data*) pode ocorrer pelos mais diversos motivos e afetar a proposta do conjunto de dados (*dataset*), como apontado por Ribeiro (2015). Esta situação possibilita a realização de estudos sobre a imputação de dados, que é uma área



amplamente abordada, visto sua colaboração em pesquisas e trabalhos acadêmicos, como apontado por Jäger, Allhorn e Bießmann (2021), o que nos leva ao estudo atual.

A imputação de dados faltantes se apresenta como uma ferramenta importante para o SGP, pois por meio dela será possível realizar uma análise dos dados mais precisa, ajudando a garantir a precisão, integridade e utilidade dos conjuntos de dados para tomada de decisões. Schreiber et al (2021), explica que a imputação de dados emergiu como um campo de pesquisa em expansão, impulsionado pela crescente instabilidade dos conjuntos de dados atuais. Esse fenômeno é resultado do frenético aumento na quantidade de dados, chamados também de big data, gerados ao longo dos anos, impulsionado pelo avanço contínuo das tecnologias.

Diante disso, este trabalho teve como objetivo de imputar dados faltantes de variáveis no banco de dados restrito ao território do estado do Ceará, criado para o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) com de dados oriundos de 47 projetos rodoviários fornecido pelo próprio DNIT e 10 projetos fornecidos pela Secretaria de Obras Públicas do Ceará (SOP/CE)O banco de dados foi produzido através da digitalização de dados de antiga tabelas dos relatórios de projetos rodoviários.

Para a imputação dos dados ausente, foi desenvolvido um modelo de previsão dos dados geotécnicos de sub-leito das rodovias do Estado do Ceará, podendo assim, completar as lacunas do banco de dados existente, prevendo os dados faltantes de umidade ótima (OT), densidade seca (DEN), Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão (EXP).

METODOLOGIA

Para a concepção deste estudo, empregaram-se uma variedade de técnicas avançadas de ciência de dados com o intuito de manipular e processar os dados brutos do conjunto inicial. Posteriormente, uma análise minuciosa envolvendo a utilização de quinze modelos distintos de classificação foi conduzida, visando antever os padrões e comportamentos subjacentes aos dados analisados.

O *dataset* foi georreferenciado, como apresentado na Figura 01, destacando a ampla diversidade de amostras que foram coletadas. Primeiramente todas as 7 mil linhas de dados no *dataset* do DNIT foram expostas as análises descritivas, visando o melhor entendimento dos dados, assim no *dataset* foi separado as variáveis que seriam úteis para a previsão, deste modo enxugando o mesmo e utilizando as seguintes colunas:

- Estaca: Esta variável representa as marcações ao longo da extensão da rodovia, permitindo a identificação precisa de cada ponto de medição. Cada estaca tem um espaçamento de 20 metros de distância uma da outra.
- OT (%) - Umidade Ótima: Refere-se à porcentagem de umidade ótima para a compactação do solo. A umidade ótima é determinada através de ensaios de compactação, sendo crucial para garantir a estabilidade e durabilidade do pavimento.
- DEN (g/cm^3) - Densidade Seca: Indica a massa específica seca do solo, fornecendo informações sobre sua compactação e resistência.



DOI: 10.29327/1430212.49-37

**METODOLOGIA INTEGRADA PARA IMPUTAÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS RODVIÁRIOS:
COMBINAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO**

- ISC/CBR (%) - Índice de Suporte Califórnia (ISC) / Índice de Resistência Califórnia (CBR): Este índice quantifica a resistência do solo, sendo crucial na determinação da capacidade de suportar cargas e tráfego.
- EXP (%) - Expansão: Refere-se à porcentagem de expansão do solo, que pode impactar significativamente a estabilidade e integridade do pavimento.
- Granulometria (50,8 (#2") - 0,074 (#200)): Especifica a distribuição granulométrica do solo, ou seja, a proporção de diferentes tamanhos de partículas. A granulometria é determinada através de ensaios de peneiramento, onde se calcula a porcentagem de cada fração granulométrica em relação ao total de material pré-definido.
- Local/Rodovia: Indica a localização específica da rodovia, fornecendo contexto geográfico e ambiental para os dados coletados.

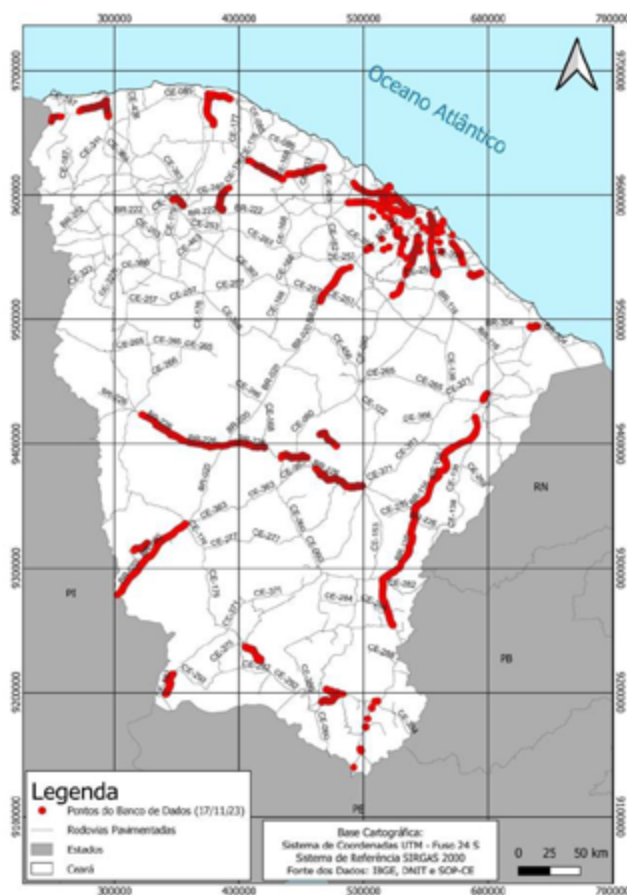


Figura 01. Mapa de localização dos pontos georreferenciados (Autores, 2024).

Tendo apenas Local/Rodovia como variável qualitativa, após separada as variáveis, foram feitos os pré-processamentos necessários, tais quais a tipagem correta dos dados e eliminação de dados errôneos. Oliveira (2022) corrobora em sua tese que, o pré-tratamento se faz necessário para provocar melhorias na interpretação e simplificar o modelo, fazendo com que seja mais robusto e confiável contra essas variações indesejáveis.



Para que fosse possível realizar a produção dos modelos de previsão de forma correta foi eliminado por hora todos os dados faltantes do *dataset*, após isso foram feitos os pré-processamentos comuns a todo estudo de previsão tais quais: *One-Hot Encoding* e a Padronização e Logaritmo, como apresentado na Figura 02.

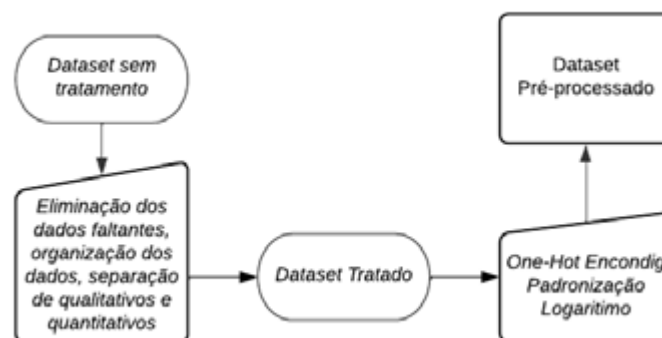


Figura 02. Fluxograma de Pré-Processamento (Autores, 2024).

Após o pré-processamento, foi feita a criação dos modelos. É importante ressaltar que para cada grupo de modelos foi retirada a variável em questão para produzir o modelo corretamente. No total, foram testados 15 modelos diferentes, sendo eles: Regressão Linear, Suporte à Regressão Vetorial (SRV), Rede Neural Artificial (RNA), Árvore de Decisão, Floresta Aleatória, *XGBoost* e os modelos otimizados para Árvore de Decisão, Floresta Aleatória, *XGBoost* com as otimizações mais usadas, sendo elas: *GridSearch*, *RandomizedSearch* e *BayesSearch*. Sendo o Floresta Aleatória e *XGBoost* os modelos com os melhores resultados, tais quais apresentaram respostas satisfatórias em outros trabalhos, como é explanado por Gioia, Barros e Silva (2022).

Para o treinamento dos modelos, os dados foram separados de acordo com os testes realizados. Sendo a separação de 85% dos dados para treino e 15% para teste, buscando evitar o *overfitting* e *underfitting*. Os modelos foram treinados sem otimização com parâmetros padrões e os modelos otimizados tiveram seus parâmetros calculados pelos algoritmos de otimização, assim sendo escolhido os melhores, com base na limitação da máquina a qual foi utilizada para realizar o estudo. Sendo ela um notebook Acer Nitro 5 com seguintes especificações: placa gráfica GeForce® GTX™ 1650 com memória dedicada VRAM de 4GB GDDR5, Processador Intel® Core™ i5-9300H Quad Core 9ª geração, além dos 16 GB de memória tipo DDR4. A Figura 03 ilustra o funcionamento do treinamento.



Figura 03. Fluxograma de treinamento dos modelos (Autores, 2024).

Depois disso foi realizada a imputação de dados utilizando os modelos treinados, no estudo em questão, em decorrência dos diversos dados faltantes, das quatro variáveis em diferentes linhas do *dataset*, cerca de 25% das linhas havia pelo menos uma das quatro colunas faltantes, então foi



DOI: [10.29327/1430212.49-37](https://doi.org/10.29327/1430212.49-37)

METODOLOGIA INTEGRADA PARA IMPUTAÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS RODOVIÁRIOS:
COMBINAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO

proposta a seguinte solução: primeiramente as outras colunas que não as quatro focais do estudo foram inseridas por meio de imputação de dados simples, por meio do *K-Vizinhos Próximos (KNNImputer)* devido a sua baixa taxa de dados faltantes, estando todos por volta de 1%. Supardianto, Lalu Mutawali e Wafiah Murniati (2022) explicam que o *KNNImputer* é utilizado para lidar com conjuntos de dados que contêm valores ausentes, baseado na ideia de que observações semelhantes tendem a ter valores similares.

Feito isso foi selecionado o melhor modelo para cada variável e separadamente foi realizada a disjunção da coluna do *dataset*. Agora, com os dados faltantes, e devido a isso, muitas das linhas possuem mais de uma das colunas focais sem dados, faltando tanto para a variável separada quanto alguma outra das variáveis estudadas, logo para que os modelos preparados possam ser usados, têm que utilizar de algum método de imputação de dados comum, tal como o utilizado para os outros dados do *dataset*, sendo ele o *KNNImputer*, visto que o mesmo possui bons resultados no *dataset* em questão, assim, apenas no momento de utilização de cada modelo separadamente o banco esteja totalmente populado, fora a variável a qual é direcionada o modelo, só então é realizada a imputação de dados com o melhor modelo para cada coluna.

A imputação de dados por meio de modelos de previsão apresenta o seu melhor caso quando a coluna em questão é o único dado faltante entre os quatro da linha, e em pior caso temos as linhas onde todos as quatro colunas estão sem valor, porém devido ao as outras colunas do *dataset*, as quais foram utilizadas para o treinamento dos modelos e também aos valores imputados pelo *KNN Imputer*, é possível obter resultados satisfatórios até mesmo em piores casos.

Para que fosse possível validar a eficácia da solução utilizando os modelos de previsão foi desenvolvido um algoritmo capaz de verificar as métricas de erro dos valores imputados, primeiramente foi retirado todos os dados nulos do *dataset*, para que sempre houvesse como comparar o resultado da imputação de dados, então logo após foram retirados de forma pseudo aleatória 25% dos dados para cada variável focal, e só então os dados foram imputados e comparados aos dados reais, além de aplicada a técnica de imputação de dados envolvendo os modelos, também foram utilizados: *Simple imputer* utilizando a média como parâmetro descritivo e o *KNN imputer*, dois dos principais imputadores utilizados atualmente, os resultados obtidos foram favoráveis a técnica proposta neste estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o processo de estudo do *dataset*, preparação dos dados, produção dos modelos e imputação de dados, foram obtidos dados relevantes para literatura e até mesmo para uso prático e profissional. Nesta seção serão expostos os resultados obtidos após a utilização do método proposto no *dataset* fornecido.

Primeiramente pode-se expor aqui os dados encontrados por meio da análise descritiva, onde foi retirado informações interessantes para a modelagem e análise de desempenho dos modelos, é possível observar os principais dados das variáveis na Tabela 1:



Tabela 1. Análises descritivas dos dados (Autores, 2024).

	ISC/CBR	OT	DEN	EXP
Média	18.995	10.088	1.920	0.164
Mediana	13.000	9.800	1.900	0.080
Moda	10.000	9.000	1.900	0
Desvio padrão	17.615	2.475	0.382	0.358
Amplitude	146.000	51.400	14.330	9.300
Variância	310.303	6.126	0.145	0.128

Após a análise descritiva tem-se os resultados obtidos para cada modelo feito e como exposto na metodologia foram utilizados 15 modelos, sendo 9 deles otimizados, não coincidentemente, os mesmos tiveram os melhores resultados para todas as variáveis. Sendo utilizada as seguintes métricas para avaliação do modelo:

- R^2 Score: é um coeficiente de determinação, isso implica que o R^2 está sendo usado como uma medida para avaliar a qualidade do ajuste do modelo (DUENHA et al., 2020). Quanto mais próximo de 1 o valor de R^2 indica um bom ajuste do modelo aos dados, enquanto um valor baixo indica um ajuste insatisfatório (Z. LI, S. LI e N. BIRBILIS, 2024). Os mesmos apresentam a Equação 1 para se obter o valor de R^2 Score:

$$R^2 \text{ Score} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

Onde:

N é o número total de dados;

y_i é o valor real

\bar{y} é o valor médio de todos os valores observados;

\hat{y}_i é o valor previsto.

- Erro médio Absoluto (MAE): quantifica a magnitude média dos erros de previsão em relação aos valores reais, sem considerar se os erros são positivos ou negativos (JONER, 2020). O seu valor é obtido de acordo com a Equação 2, apresentada pelo o mesmo autor:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

Onde:

n é o número total de dados

y_i é o valor real

\hat{y}_i é o valor previsto



DOI: 10.29327/1430212.49-37

METODOLOGIA INTEGRADA PARA IMPUTAÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS RODOVIÁRIOS:
COMBINAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO

- Erro Quadrático Médio da Raiz (RMSE): é uma métrica utilizada para avaliar a precisão de modelos de previsão ou estimativa em relação aos valores reais, quanto menor o valor do RMSE, melhor o desempenho do modelo, pois indica que as previsões estão, em média, mais próximas dos valores reais (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011). A Equação 3 é utilizada para calcular o RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

Onde:

n é o número total de dados

 y_i é o valor real \hat{y}_i é o valor previsto

- Erro Quadrático Médio da Raiz Logarítmica (RMSLE): ela irá avaliar a precisão de modelos de previsão, para fazer o seu cálculo, é adicionado 1 a ambos os valores reais e previstos antes de calcular o logaritmo natural para evitar problemas com o logaritmo de zero, permitindo a sua aplicabilidade mesmo que um dos valores seja zero, porém ambos valores não podem ser negativos (OLIVEIRA, 2019). A Equação 4 mostra como o seu valor pode ser calculado:

$$RMSLE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log(y_i + 1) - \log(\hat{y}_i + 1))^2} \quad (4)$$

Onde:

n é o número total de dados

 y_i é o valor real \hat{y}_i é o valor previsto

Munido dos dados pré-processados, e a separação de teste do *dataset*, os modelos foram testados com 15% dos dados totais como proposto pela metodologia, e então foram obtidos os resultados em forma das métricas expostas. Para melhor entendimento, os resultados dos 3 melhores modelos serão demonstrados a seguir por meio de Tabelas 2, 3, 4 e 5 separadas por variável:

Tabela 2. Desempenho dos modelos para variável ISC/CBR (AUTORES, 2024).

ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC) / ÍNDICE DE RESISTÊNCIA CALIFÓRNIA (CBR)

Modelo	R ² Score	MAE (%)	RMSE (%)	RMSLE
Floresta aleatória <i>Bayes Search</i>	0,814	0,251	0,469	0,117
Floresta aleatória <i>Grid Search</i>	0,813	0,248	0,471	0,117



Diego Vieira de Souza, Mariana Gonçalves da Silva,
Brunna Mikaelli Pinho da Silva, Francisco Junior Peixoto Dantas,
Antonio Junior Alves Ribeiro & Suelly Helena de Araújo Barroso

Floresta aleatória <i>Randomized Search</i>	0,811	0,254	0,473	0,117
--	-------	-------	-------	-------

Tabela 3. Desempenho dos modelos para variável Umidade Ótima (AUTORES, 2024).

UMIDADE ÓTIMA (OT)				
Modelo	R ² Score	MAE (%)	RMSE (%)	RMSLE
Floresta aleatória <i>Grid Search</i>	0,651	0,399	0,571	0,164
Floresta aleatória <i>Randomized Search</i>	0,649	0,399	0,573	0,151
Floresta aleatória <i>Bayes Search</i>	0,644	0,41	0,576	0,163

Tabela 4. Desempenho dos modelos para variável Densidade Seca (AUTORES, 2024).

DENSIDADE SECA (DEN)				
Modelo	R ² Score	MAE (g/cm ³)	RMSE (g/cm ³)	RMSLE
Floresta aleatória <i>Bayes Search</i>	0,710	0,360	0,522	0,135
Floresta aleatória <i>Grid Search</i>	0,708	0,361	0,524	0,179
SRV	0,695	0,397	0,535	0,169

Tabela 5. Desempenho dos modelos para variável Expansão (AUTORES, 2024).

EXPANSÃO (EXP)				
Modelo	R ² Score	MAE (%)	RMSE (%)	RMSLE
<i>XGBoost Bayes Search</i>	0,327	0,334	1,08	0,191
Floresta aleatória <i>Grid Search</i>	0,325	0,322	1,082	0,187
Floresta aleatória <i>Bayes Search</i>	0,312	0,330	1,092	0,190

Verificados resultados razoavelmente satisfatórios para principalmente para o R² Score na maioria das variáveis, onde quanto mais próximo de 1 melhor explica a variabilidade dos dados, vemos também que para todos os modelos o RMSE é maior que o MAE levando a entender que existem *outliers* nos dados, Aires (2022) explica que essa comparação pode servir como um indicativo da presença de *outliers* nos dados, o que é corroborado com a análise descritiva, esses *outliers* podem afetar negativamente os modelos de previsão, porém os resultados obtidos sobre o Erro Médio Absoluto e as outras métricas, se faz perceber que comparado à análise descritiva os modelos apresentam um bom resultado. Logo, para próxima etapa foram utilizados os modelos com melhores

DOI: [10.29327/1430212.49-37](https://doi.org/10.29327/1430212.49-37)METODOLOGIA INTEGRADA PARA IMPUTAÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS RODOVIÁRIOS:
COMBINAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO

métricas dentre os testados, sendo eles: Floresta aleatória *Bayes Search*, Floresta aleatória *Grid Search*, Floresta aleatória *Bayes Search* e *XGBoost Bayes Search*, respectivamente para as variáveis: ISC/CBR, OT, DEN, EXP.

Passando para fase de imputação de dados, foram obtidos ótimos resultados quando comparados a outros métodos de imputação mais utilizados atualmente, se utilizando da proposta de validar a técnica idealizada pelo estudo, foi realizado o teste para a imputação dos dados separando os dados não nulos e aplicando a remoção de 25% dos dados para cada variável focal e logo após a imputação de dados e validação como proposto pela metodologia, os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 6. Resultados Imputador Simples Media (Autores, 2024).

	R² Score	MAE	RSME
OT (%)	0.711	0.192	0.533
DEN (g/cm ³)	0.735	0.067	0.176
ISC/CBR (%)	0.764	0.154	0.476
EXP (%)	0.655	0.133	0.584

Tabela 7. Resultados *KNN Imputer* (Autores, 2024).

	R² Score	MAE	RSME
OT (%)	0.824	0.132	0.416
DEN (g/cm ³)	0.905	0.038	0.105
ISC/CBR (%)	0.913	0.085	0.288
EXP (%)	0.835	0.095	0.403

Tabela 8. Resultados da metodologia proposta (Autores, 2024).

	R² Score	MAE	RSME
OT (%)	0.941	0.086	0.239
DEN (g/cm ³)	0.283	0.112	0.289
ISC/CBR (%)	0.894	0.073	0.319
EXP (%)	0.940	0.074	0.243

Com os resultados expostos pode-se perceber que para todas as variáveis exceto o DEN (g/cm³), possivelmente devido a escala de seus dados e sua pequena variância, temos resultados comparáveis e até superiores para o *R² Score*, e para o Erro médio absoluto tem-se resultados melhores que os dois imputadores utilizados, entendendo-se que o método é válido e oferece resultados ótimos quando comparado a métodos de imputação de dados já conhecidos.

CONCLUSÃO

Através desta implementação, a técnica foi capaz de imputar valores de dados faltantes com precisão para a maioria das colunas propostas, um ato que mantém não apenas a integridade e a qualidade do conjunto de dados, mas também serve para futuros estudos dependentes de dados. Além disso, a adoção do método proposto garante a eliminação de investimentos em testes de campo redundante



onde a imputação de dados pode ser realizada rapidamente. Isto leva a uma conservação substancial dos gastos financeiros e temporais.

O sucesso da metodologia proposta pode ser apreciado pelas métricas reveladas através dos resultados. Quando vista juntamente com os métodos de imputação de dados convencionais, a comparação sublinha a sua competitividade e viabilidade, indicando assim que tem-se uma forte razão para considerar esta abordagem de forma favorável. Com esta informação, é seguro dizer que a solução aqui apresentada é eficaz e promissora para abordar valores faltantes, uma abordagem que deve formar uma base sólida sobre quais análises e tomadas de decisão adicionais podem ser realizadas em contextos profissionais ou acadêmicos.

REFERÊNCIAS

AIRES, U. R. V. Modelagem temporal e espacial da concentração superficial de sedimentos utilizando sensoriamento remoto orbital e aprendizado de máquina. 2022. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2022.

DUENHA, L.; SONOHATA, R.; ARIGONI, D.; SANTOS, R. Preditor de Desempenho de GPUs aplicado à Exploração do Espaço de Projetos ciente de Dark Silicon. In: SIMPÓSIO EM SISTEMAS COMPUTACIONAIS DE ALTO DESEMPENHO (SSCAD), 21. , 2020, Online. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2020 . p. 299-310.

Gioia, T.; Barros, J. R.; Silva, R. R. (2022). Fatores socioeconômicos e algoritmos de machine learning aplicados à predição de risco de doenças negligenciadas.: Estudo de caso nos municípios do Estado de Goiás e Distrito Federal, Brasil. *Finisterra*, 57(121), 109–123.

Guilherme, A. T. P., da Silva, C. A. U., Ribeiro, A. J. A., & de Araújo Barroso, S. H. (2020). Previsão estatística e mapeamento das propriedades geotécnicas dos solos da microrregião de mossoró-RN. *Brazilian Journal of Development*, 6(4), 22297-22318.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, n. 4, p. 591–608, 2011.

JÄGER S.; ALLHORN A.; BIESSMANN F. (2021). Um benchmark para métodos de imputação de dados. *Frente. Grandes Dados* 4:693674. doi: 10.3389/fdata.2021.693674

JONER, Henrique. Inferência preditiva geoespacial da criminalidade em Porto Alegre: uma abordagem de aprendizado de máquina. 2020. Dissertação Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Ciências Econômicas da UFRGS, Porto Alegre - RS, 2020.

LI, Z.; LI, S.; BIRBILIS, N. A machine learning-driven framework for the property prediction and generative design of multiple principal element alloys. *Materials Today Communications*, v. 38, p. 107940, 2024.

OLIVEIRA, F. T. M.. Predição do tempo de viagem com base em trajetórias automobilísticas. 2019. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação)-Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Quixadá, 2019.

OLIVEIRA, R. Co. G. Previsão de ozônio troposférico na região metropolitana do Rio de Janeiro com base em técnicas de imputação de dados faltantes e calibração multivariada. 2022. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.



[DOI: 10.29327/1430212.49-37](https://doi.org/10.29327/1430212.49-37)

**METODOLOGIA INTEGRADA PARA IMPUTAÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS RODOVIÁRIOS:
COMBINAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO**

RIBEIRO, A. J. A.; SILVA, C. A. U.; BARROSO, S. H. A. (2018). Metodologia de baixo custo para mapeamento geotécnico aplicado à pavimentação. *Transportes*, v.26, p.84-100.

RIBEIRO, E. A. Imputação de dados faltantes via algoritmo EM e rede neural MLP com o método de estimativa de máxima verossimilhança para aumentar a acurácia das estimativas. 2015. 162 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2015.

SCHREIBER, Jonas F. et al. Técnicas de imputação de dados aplicadas ao ambiente dassmart grids: uma revisão. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, v. 8, n. 1, 2021.

SONCIM, S. P., & JÚNIOR, J. L. F. (2012). Desenvolvimento de um modelo de desempenho de irregularidade longitudinal para a rede de rodovias em tratamento superficial duplo do estado da Bahia. *Transportes*, 20(1), 13-21.

SONCIM, S. P., JÚNIOR, J. L. F., de CAMPOS, L. E. P. (2014). Modelo de previsão da área de desgaste em pavimentos rodoviários com revestimento em tratamento superficial. *Transportes*, 22(2), 51-61.

SOUZA, W. M. D., RIBEIRO, A. J. A., & SILVA, C. A. U. D. (2021). Uma abordagem alternativa para obtenção da classificação de solos da AASHTO usando redes neurais artificiais.

SUPARDIANTO, LALU Mutawalli, and WAFIAH Murniati, “Penerapan Knnimputer Dalam Mengolah Data Missing Value Untuk Membantu Meningkatkan Akurasi Support Vector Machine Klasifikasi Penyakit Tiroid”, *JINTEKS*, vol. 4, no. 4, pp. 386-390, Nov. 2022.

AGRADECIMENTOS

Os pesquisadores agradecem ao DNIT, a CAPES, a Universidade Federal do Cariri (UFCA), a Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao Instituto Federal do Ceará (IFCE) pelo apoio e financiamento à pesquisa.



AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MANUTENÇÃO DO TRECHO DA BR-101/NORTE NO ESTADO DE SERGIPE EMPREGANDO O ÍNDICE DE QUALIDADE DA MANUTENÇÃO (IQM): ESTUDO DE CASO

Stéfanny Bruna Oliveira Andrade & Andrea Santana Teixeira Lins¹

RESUMO

As rodovias são as principais vias de circulação das pessoas, mercadorias e veículos, possuindo grande importância para o avanço de um país, como é o caso do Brasil. Por ser um local de elevado fluxo, devem ser realizados serviços de manutenção que conservem e restaurem as características originais das rodovias, uma vez que elas sofrem ações do tempo, clima e carga de veículos. Ademais, é fundamental avaliar a qualidade de manutenção de uma rodovia, a fim de que seja compreendido o estado de conservação dela, atentando-se aos seus principais problemas existentes e suas respectivas soluções. Esse estudo propõe o Índice de Qualidade da Manutenção (IQM) como um parâmetro para avaliar o nível de qualidade da pavimentação e da conservação de rodovias. Por conseguinte, aplica o índice proposto na avaliação do trecho da BR-101/Norte, localizada no estado de Sergipe, entre os meses de outubro a dezembro de 2022. A avaliação foi realizada em campo e apontou a situação que se encontrava a rodovia estudada, bem como os problemas existentes na mesma. Também foi possível realizar uma análise comparativa do IQM proposto no estudo com o ICM (Índice de Condição de Manutenção), indicador de qualidade das rodovias adotado pelo DNIT. Constatou-se que o IQM não se limitou a avaliar de forma generalizada os defeitos encontrados no pavimento, bem como pontuar os níveis de conservação da rodovia, tal como preconiza o ICM. A elaboração do modelo proposto pelo IQM aponta os principais problemas existentes no trecho da BR-101/Norte estudado. Por fim, chegou-se à conclusão de que o quanto importante é a realização da avaliação da manutenção da rodovia, já que através dela há um direcionamento para os principais problemas existentes, tal como a qualidade dos serviços que estão sendo executados e o nível de conservação da mesma.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento; Índice; Qualidade; Conservação; Manutenção.

ABSTRACT

Highways are the main routes for the circulation of people, goods and vehicles, having great importance for the advancement of a country, as is the case of Brazil. As it is a place with high traffic, maintenance services must be carried out to preserve and restore the original characteristics of the highways, as they suffer from the effects of time, climate and vehicle load. Furthermore, it is essential to evaluate the quality of maintenance of a highway, so that its state of conservation is understood, paying attention to its main existing problems and their respective solutions. This study proposes the Maintenance Quality Index (IQM) as a parameter to evaluate the quality level of paving and highway conservation. Therefore, it applies the proposed index in the evaluation of the stretch of BR-101/Norte, located in the state of Sergipe, between the months of October to December 2022. The evaluation was carried out in the field and pointed out the situation of the studied highway, as well as the problems that exist therein. It was also possible to carry out a comparative analysis of the IQM proposed in the study with the ICM (Maintenance Condition Index), a highway quality indicator adopted by DNIT. It was found that the IQM was not limited to a generalized assessment of the defects found in the pavement, as well as scoring the highway's conservation levels, as recommended by the ICM. The elaboration of the model proposed by IQM highlights the main problems existing in the section of BR-101/Norte studied. Finally, we came to the conclusion of how important it is to carry out an assessment of highway maintenance, since through it there is a focus on the main existing problems, such as the quality of the services being performed and the level of conservation of the road same.

KEY WORDS: Pavement; Index; Quality; Conservation; Maintenance.

¹ Instituto Federal de Sergipe, brunaoliveiraandrade@gmail.com; andrea.lins@academico.ifs.edu.br



DOI: [10.29327/1430212.49-106](https://doi.org/10.29327/1430212.49-106)

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MANUTENÇÃO DO TRECHO DA BR101/NORTE
NO ESTADO DE SERGIPE EMPREGANDO O ÍNDICE DE QUALIDADE DA MANUTENÇÃO (IQM):
ESTUDO DE CASO**

INTRODUÇÃO

“Governar é abrir estradas”. Essa famosa frase do presidente Washington Luís reflete a importância das rodovias para o Brasil. Entre 1926 e 1930 foi desenvolvido o fundo especial para a construção e manutenção de estradas de rodagem federais, o que constituiu o primeiro alicerce institucional para a inserção de um sistema predominantemente rodoviário. Outrossim, nas décadas de 1960 e 1970, houve a implantação dessa política rodoviária e, por conseguinte, o desenvolvimento das técnicas de pavimentação, cujos investimentos significativos eram de cunho estatal e objetivavam o avanço tecnológico, econômico e social do país.

Segundo Senço (2008), pavimento é uma estrutura feita sobre a terraplanagem, que necessita resistir e distribuir os esforços verticais oriundos do tráfego, melhorando as condições de rolamento, no que concerne a segurança e conforto do usuário, bem como resistir aos esforços horizontais (desgastes), tornando mais durável a superfície de rolamento.

Por ser o pavimento uma estrutura formada por camadas de espessuras estabelecidas, construída após a conclusão da terraplanagem é importante que este seja projetado com base em especificações técnicas, de maneira economicamente viável, com o intuito de proporcionar segurança e conforto aos seus usuários, conceber economia nos veículos e resistir aos esforços produzidos pelo clima e pelo tráfego de veículos.

Apesar da sua grande importância, mais de 50% das rodovias brasileiras apresentam algum tipo de deficiência no pavimento. Caso sejam considerados também os defeitos de sinalização e a geometria da via, a porcentagem de rodovias que apresentam problemas aumenta para 67,5% da extensão (CNT, 2023). Dito isso, esses dados mostram o descaso ou até mesmo a falta de qualidade dos serviços que são executados na malha rodoviária, que vão desde execução à manutenção do pavimento, comprometendo seu desempenho.

O Manual de Conservação Rodoviária do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte afirma que “a conservação rodoviária compreende o conjunto de operações rotineiras, periódicas e de emergência realizadas com o objetivo de preservar as características técnicas e físico-operacionais do sistema rodoviário e das instalações fixas, dentro dos padrões de serviço estabelecidos” (DNIT, 2005).

Dessarte, os serviços de conservação das rodovias devem estar direcionados a elementos físicos, isto é, aqueles que estão ligados às condições da pista, em termos de pavimentação, drenagem, sinalização vertical e horizontal e dispositivos de segurança. Também está relacionada a esse sistema a faixa de domínio, sendo associada à manutenção toda a tarefa executada, como roçada, aceiros e calhas.

As rodovias não duram para sempre. Ainda que a implantação do pavimento seja realizada perfeitamente, ele sofre ação do tempo, do clima e pode se desgastar devido às cargas dos veículos. Todos esses elementos podem ocasionar trincas, ondulações, afundamentos e outras patologias que necessitam de intervenção, que objetiva garantir as boas condições de segurança e tráfego dos usuários, visto que estes possuirão melhores condições de acessibilidade e mobilidade, resultando em um tráfego com menores riscos de acidentes.

Um projeto com uma percepção eficaz de conservação rotineira nas rodovias é de suma importância para avaliar a qualidade da malha rodoviária. Além disso, deve-se realizar análises para verificar quando é essencial fazer manutenções, atuando na conservação e restauração de rodovias. Vale ressaltar, que no primeiro contexto o foco é evitar o agravamento dos problemas existentes. Em contrapartida, a conservação é formada por serviços que devem ser desempenhados frequentemente, como roçada costal, capina manual e limpeza de dispositivos de drenagem. Já o último caso, objetiva recuperar a rodovia ou parte dela, conservando suas características originais.



Para Silva (2017), a avaliação da condição do pavimento é uma técnica de engenharia amplamente empregada em sistemas de gerenciamento de pavimentos, e objetiva fornecer um diagnóstico acerca da qualidade dos mesmos a partir de índices que são calculados.

O objetivo desse trabalho é propor um indicador, o Índice de Qualidade da Manutenção (IQM), e aplicá-lo na avaliação do trecho da rodovia BR-101/Norte (trecho entre o km 0,0 e o km 93,4) situado no estado de Sergipe, fazendo um comparativo entre os valores obtidos do IQM com os valores calculados do Índice de Condição de Manutenção (ICM), indicador de qualidade das rodovias federais adotado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

METODOLOGIA

Área de Estudo

O trecho da rodovia da BR-101, situado no norte do estado de Sergipe, avaliado nesse estudo possui uma extensão total de 93,40 km e passa por onze municípios sergipianos, os quais são: Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras, Maruim, Rosário do Catete, Japarutuba, Capela, Muribeca, Malhada dos Bois, São Francisco, Cedro de São João e Propriá (Figura 1).



Figura 1. Mapa de situação da BR-101/Norte no estado de Sergipe (VIA 101, 2022).

Além disso, esse trecho da BR-101/Norte corresponde a uma rodovia de pavimento flexível e de pavimento rígido, a qual possui seus 93,40 quilômetros distribuídos entre pistas simples e pistas duplicadas. Deste modo, em relação ao tipo de pista tem-se:

- Do km 0 ao km 51 - pista duplicada;
- Do km 52 ao km 76 - pista simples;
- Do km 77 ao km 93,4 - pista duplicada.

Já no que concerne à natureza do pavimento tem-se:

- Do km 0 ao km 51 - pavimento rígido (sentido crescente) e pavimento flexível (decrecente);
- Do km 52 ao km 69 - pavimento flexível;
- Do km 70 ao km 76 - pavimento rígido;
- Do km 77 ao km 93,4 - pavimento flexível.



DOI: [10.29327/1430212.49-106](https://doi.org/10.29327/1430212.49-106)

**AValiação da Qualidade da Manutenção do Trecho da BR101/NORTE
NO ESTADO DE SERGIPE EMPREGANDO O ÍNDICE DE QUALIDADE DA MANUTENÇÃO (IQM):
ESTUDO DE CASO**

Indicador de Qualidade das Rodovias Federais (ICM)

Em conformidade com o Ministério de Infraestrutura, para avaliar a qualidade de uma rodovia é realizado mensalmente o levantamento do ICM (Índice de Condição de Manutenção). Esse indicador é gerado por meio de um aplicativo criado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), onde os dados requeridos são inseridos por um profissional que avalia quilômetro por quilômetro da rodovia, considerando a condição da malha, ou seja, verificando a existência de buracos, trincas, remendos, a sinalização vertical e horizontal, além da situação dos dispositivos de drenagem superficial e da roçada (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2022). Outrossim, a avaliação é realizada de maneira que quanto menor a soma dos elementos melhor será o estado de conservação da pista, isto é, mais alto será o seu ICM. É importante destacar que 70% do cálculo do ICM é constituído pelo índice de pavimentação (panelas, trincas e remendo) e os 30% restantes é composto pelo índice de conservação (drenagem, roçada e sinalização).

Crítérios de Avaliação para Análise

Baseada na Instrução de Serviço Nº 10, de setembro de 2017, que dispõe sobre os procedimentos para a realização do ICM, e da norma DNIT 006/2003-PRO que se refere à avaliação objetiva da superfície de pavimentos, foi realizada, entre os meses de outubro a dezembro de 2022, a avaliação desse trecho da BR-101/Norte no estado de Sergipe determinando tanto o ICM (índice proposto pelo DNIT) quanto o IQM (Índice de Qualidade da Manutenção), índice proposto pelas autoras nesse estudo. Esta avaliação foi implementada por meio de uma inspeção na via, contando com o apoio de um motorista e um veículo motorizado, cuja velocidade média era de, aproximadamente, 40 km/h.

Como o trecho estudado da BR-101/Norte é constituído tanto por pista simples como por pistas duplicadas, a avaliação foi realizada na pista duplicada em dois sentidos (crescente e decrescente) e na pista simples foi realizada somente em um único sentido, levando em consideração as duas faixas de tráfego.

A avaliação sensorial foi realizada com o avaliador observando a situação da rodovia e preenchendo as planilhas pertinentes para cada tipo de pavimento (flexível e rígido) avaliado. Estas planilhas foram elaboradas levando-se em consideração as características intrínsecas de cada pavimento e descritas a seguir.

A. Pavimento Flexível:

- Percentual de área com trincas transversais (TT), trincas longitudinais (TL), trincas do tipo “couro de jacaré” (TJ) e trincas do tipo “blocos” (TB);
- Número de afundamentos (A), ondulações (O), panelas (P), escorregamentos (E) e remendos (R)
- Percentual de área com desgaste (D);
- Limpeza de faixa de domínio, caiação, drenagem, roçada, limpeza de dispositivos de drenagem e sinalização.

B. Pavimento Rígido:

- Percentual de área com fissuras (F);
- Número panelas (P) e remendos (R);
- Percentual de área com desgaste (D);
- Limpeza de faixa de domínio, caiação, drenagem, roçada, limpeza de dispositivos de drenagem e sinalização.



É importante frisar que o ICM não foi avaliado do km 77 ao km 51 da rodovia, pois esse trecho passava por um processo de duplicação, apresentando constantes mudanças no seu pavimento e em seus elementos de drenagem. Dessa forma, o IQM seguiu esta mesma linha de raciocínio e, por isso, a sua avaliação foi realizada para os mesmos trechos onde foi avaliado o ICM.

Adoção dos Critérios de Pavimentação para o Cálculo do IQM

Para definir a classificação dos defeitos do pavimento (bom, regular e ruim) foi necessário observar a frequência deles na pista de rolamento. A Tabela 1 apresenta os critérios adotados para o IQM.

Tabela 1. Frequência de ocorrência dos defeitos do pavimento.

FREQUÊNCIA E NÍVEL DAS OCORRÊNCIAS				
DEFEITOS DO PAVIMENTO	BOM	REGULAR	RUIM	UNIDADE
AFUNDAMENTO	ATÉ 2	DE 3 A 5	MAIOR QUE 5	QUANTIDADE/km
ONDULAÇÃO	ATÉ 2	DE 3 A 5	MAIOR QUE 5	QUANTIDADE/km
PANELA	ATÉ 2	DE 3 A 5	MAIOR QUE 5	QUANTIDADE/km
ESCORREGAMENTO	ATÉ 2	DE 3 A 5	MAIOR QUE 5	QUANTIDADE/km
DESGASTE	DESGASTE < 10%	10% < DESGASTE < 50%	DESGASTE > 50%	% DA ÁREA
REMENDO	ATÉ 2	DE 3 A 5	MAIOR QUE 5	QUANTIDADE/km
TRINCAS / FISSURAS	TRINCAS / FISSURAS < 10%	10% < TRINCAS / FISSURAS < 50%	TRINCAS / FISSURAS > 50%	% DA ÁREA

Adoção dos Critérios de Conservação para o Cálculo do IQM

Para classificar o nível de conservação (bom, regular e ruim) do trecho da rodovia estudada foi essencial observar o estado em que se encontrava a mesma. Desta forma, foram adotados os seguintes níveis de conservação para o cálculo do IQM, conforme apresenta a Tabela 2.

Tabela 2. Nível de conservação.

NÍVEL DE CONSERVAÇÃO			
CONDIÇÃO DE CONSERVAÇÃO	BOM	REGULAR	RUIM
DRENAGEM	DISPOSITIVOS SUPERFICIAIS ÍNTEGROS	DISPOSITIVOS SUPERFICIAIS COM QUEBRAS LOCALIZADAS	DISPOSITIVOS QUEBRADOS OU AUSENTES
ROÇADA	VEGETAÇÃO RASTEIRA COM ALTURA MÁXIMA DE 30 CM	VEGETAÇÃO ACIMA DE 30 CM, MAS QUE NÃO AFETA A VISIBILIDADE DA SINALIZAÇÃO VERTICAL	VEGETAÇÃO ALTA QUE AFETA A VISIBILIDADE DA SINALIZAÇÃO VERTICAL
LIMPEZA DE DISPOSITIVOS DE DRENAGEM	DISPOSITIVOS DE DRENAGEM LIMPOS E VEGETAÇÃO RASTEIRA ERRADICADA	DISPOSITIVOS DE DRENAGEM PARCIALMENTE LIMPOS E VEGETAÇÃO RASTEIRA PARCIALMENTE ERRADICADA	DISPOSITIVOS DE DRENAGEM SUJOS E VEGETAÇÃO NÃO ERRADICADA
SINALIZAÇÃO	ELEMENTOS VERTICAIS E HORIZONTAIS VISÍVEIS E EM BOAS CONDIÇÕES	ELEMENTOS VERTICAIS E HORIZONTAIS PARCIALMENTE FALTANTES E DESGASTADOS	ELEMENTOS VERTICAIS E HORIZONTAIS FALTANTES E DESGASTADOS
LIMPEZA DE FAIXA DE DOMÍNIO	FAIXA DE DOMÍNIO LIMPA E LIVRE DE OBJETOS E VESTÍGIOS DE ÓLEO OU GRAXA NA PLATAFORMA	FAIXA DE DOMÍNIO PARCIALMENTE LIMPA E LIVRE DE OBJETOS E VESTÍGIOS DE ÓLEO OU GRAXA NA PLATAFORMA	FAIXA DE DOMÍNIO SUJA E COM VESTÍGIOS DE ÓLEO OU GRAXA NA PLATAFORMA
CAIAÇÃO	ELEMENTOS CAIADOS	ELEMENTOS PARCIALMENTE CAIADOS	ELEMENTOS NÃO CAIADOS

DOI: [10.29327/1430212.49-106](https://doi.org/10.29327/1430212.49-106)

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MANUTENÇÃO DO TRECHO DA BR101/NORTE
NO ESTADO DE SERGIPE EMPREGANDO O ÍNDICE DE QUALIDADE DA MANUTENÇÃO (IQM):
ESTUDO DE CASO

Cálculo do ICM

O cálculo do ICM é realizado automaticamente, empregando um sistema disponibilizado pelo DNIT, cujo resultado é enviado digitalmente à Coordenação Geral de Manutenção e Restauração de Rodovias (CGMRR).

O valor do ICM (Índice de Conservação de Manutenção) é calculado por meio da Equação 1 abaixo apresentada:

$$ICM = IP * 0,70 + IC * 0,30 \quad (1)$$

Os valores de IP (Índice de Pavimentação) e IC (Índice de Conservação) são determinados por meio das Equações 2 e 3, respectivamente:

$$IP = (50 * P_{\text{Panela}}) + (30 * P_{\text{Remendo}}) + (20 * P_{\text{Trincamento}}) \quad (2)$$

$$IC = (30 * P_{\text{Roçada}}) + (20 * P_{\text{Drenagem}}) + (50 * P_{\text{Sinalização}}) \quad (3)$$

onde:

P_{PANELA} ; P_{REMENDO} ; $P_{\text{TRINCAMENTO}}$ - Frequência de ocorrência de panela, remendo e trincamento no pavimento, respectivamente;

$P_{\text{ROÇADA}}$; P_{DRENAGEM} ; $P_{\text{SINALIZAÇÃO}}$ - Avaliação no nível de conservação da roçada, drenagem e sinalização no pavimento, respectivamente;

É importante destacar que para determinar o valor do ICM, a expressão empregada para calcular o IP (Equação 2) é a mesma, tanto para o cálculo desse índice para um pavimento rígido como para um pavimento flexível.

Cálculo do IQM

Para o cálculo do IQM, as autoras adotaram a fórmula empírica do ICM (Equação 1), alterando as equações para o cálculo do IP e IC (Equações 2 e 3) empregadas no cálculo do ICM. Salienta-se que o Índice de Pavimentação (IP) representa 70% do valor final do IQM e o Índice de Conservação (IC) representa os 30% restantes, conforme pode ser observado na Equação 4 abaixo:

$$IQM = IP * 0,70 + IC * 0,30 \quad (4)$$

As autoras propõem as Equações 5 e 6 para serem empregadas no cálculo do IP para os pavimentos rígido e flexível, respectivamente. Essas equações empíricas apresentam elementos que são levantados em campo durante a vistoria do pavimento e estão relacionados com o estado de manutenção da via, onde para cada variável foi atribuída uma ponderação (peso), consoante com o grau de importância e magnitude do elemento vistoriado presente no pavimento.

$$IP_{\text{RÍGIDO}} = (20 * PF) + (50 * PP) + \left[30 * \left(\frac{PD+PR}{2} \right) \right] \quad (5)$$

$$IP_{\text{FLEXÍVEL}} = (20 * PT) + \left\{ 50 * \left[\left(\frac{PA+PO}{2} \right) * 0,3 + (PP * 0,7) \right] \right\} + \left[30 * \left(\frac{PE+PD+PR}{3} \right) \right] \quad (6)$$

O valor do PT (Índice de Trincas) foi definido pelas autoras como sendo o somatório dos pesos das trincas transversais, trincas longitudinais, trincas tipo “bloco” e trincas tipo “couro de jacaré, tal



como define a Equação 7 abaixo apresentada:

$$PT = \left[\left(\frac{PTT+PTL}{2} \right) * 0,3 \right] + \left[\left(\frac{PTJ+PTB}{2} \right) * 0,7 \right] \quad (7)$$

Para o cálculo do IC (Índice de Conservação), as autoras propõem a Equação 8, a qual pode ser adotada tanto para pavimentos flexíveis como para pavimentos rígidos:

$$IC = \left[25 * \left(\frac{PLD+PDG}{2} \right) \right] + (PRO * 25) + (PS * 30) + \left[20 * \left(\frac{PC+PLFD}{2} \right) \right] \quad (8)$$

onde são definidas as seguintes variáveis:

IQM - Índice de Qualidade da Manutenção;

IP - Índice de Pavimentação;

IC - Índice de Conservação;

PT - Índice de trincas;

PF - Índice das fissuras;

PP - Índice das panelas;

PD - Índice do desgaste;

PR - Índice dos remendos;

PTT - Índice das trincas transversais;

PTL - Índice das trincas longitudinais;

PTJ - Índice das trincas do tipo “couro de jacaré”;

PTB - Índice das trincas do tipo “blocos”;

PA - Índice do afundamento;

PO - Índice da ondulação;

PE - Índice do escorregamento;

PLD - Índice da limpeza de dispositivos de drenagem;

PDG - Índice da drenagem;

PRO - Índice da roçada;

PS - Índice da sinalização;

PC - Índice da caiação;

PLFD - Índice da limpeza de faixa de domínio.

Os valores utilizados para definir o estado de conservação de acordo com a frequência de ocorrência dos defeitos encontrados no pavimento (trinca, fissura, afundamento, ondulação, panela, escorregamento, desgaste e remendo) e adotados para o cálculo do índice de pavimentação (IP) foram os seguintes: 0,25 (para o nível de conservação considerado “bom”), 0,50 (para o nível de conservação considerado “regular”) e 1,00 (para o nível de conservação considerado “ruim”).

Os valores utilizados para definir o nível de conservação no que diz respeito às atividades de manutenção do pavimento (limpeza de faixa de domínio, caiação, drenagem, roçada, limpeza de dispositivos de drenagem e sinalização) adotados para o cálculo do índice de conservação (IC) foram os seguintes: 0,25 (para o nível de conservação considerado “bom”), 0,50 (para o nível de conservação considerado “regular”) e 1,00 (para o nível de conservação considerado “ruim”).



DOI: 10.29327/1430212.49-106

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MANUTENÇÃO DO TRECHO DA BR101/NORTE
NO ESTADO DE SERGIPE EMPREGANDO O ÍNDICE DE QUALIDADE DA MANUTENÇÃO (IQM):
ESTUDO DE CASO**

Destarte, o conceito de qualidade da manutenção do pavimento depende do resultado calculado pela aplicação da equação do IQM (Equação 4), tomando-se como base a classificação definida pela Tabela 3 a seguir apresentada:

Tabela 3. Classificação do IQM.

FAIXA	CONDIÇÃO
$IQM < 30$	BOM
$30 \leq IQM < 50$	REGULAR
$50 \leq IQM < 70$	RUIM
$IQM \geq 70$	PÉSSIMO

Descrição do Processo

A avaliação do trecho estudado da BR-101/Norte foi sempre realizada nas últimas semanas de cada mês (entre os meses de outubro, novembro e dezembro de 2022) objetivando analisar o estado de manutenção da rodovia ao longo do decorrer de cada mês. Nessa avaliação eram preenchidas as planilhas e realizados registros fotográficos do estado de conservação e de pavimentação de cada trecho avaliado.

Posteriormente, era realizado o cadastro dos dados em tabelas no Excel para que fossem definidos os pesos de cada defeito do pavimento em relação a sua frequência de ocorrência, bem como de cada condição de conservação em relação ao seu nível de conservação. Após a aplicação dos pesos nas equações, eram calculados os valores do IP e do IC empregando as suas respectivas equações e, por fim, era feito o cálculo do IQM.

No processo de escolha dos índices de ponderação foi necessário a análise minuciosa dos dados e a aplicação das teorias para saber quais elementos detinham maior influência sobre o estado de conservação da rodovia. Por isso, nessa fase foram realizadas algumas mudanças até que se chegasse a um resultado satisfatório dos pesos.

Ao final, os resultados do IQM foram analisados e comparados com os do ICM, objetivando mostrar as principais diferenças e semelhanças entre esses dois índices, levando-se em consideração o real estado de conservação do trecho BR-101/Norte estudado.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Análise Comparativa entre ICM e IQM no Mês de Outubro

A Tabela 4 abaixo apresenta os valores do ICM e do IQM para o mês de outubro de 2022. Verifica-se que o resultado do ICM foi pior do que o do IQM, visto que o ICM faz uma avaliação generalizada da rodovia, enquanto o IQM avalia mais especificamente seus elementos.

Tabela 4. Valores do ICM e do IQM no mês de outubro.

ANÁLISE COMPARATIVA		
AVALIAÇÃO	ICM	IQM
PÉSSIMO	18%	0%
RUIM	18%	16%
REGULAR	11%	34%
BOM	53%	50%



O ICM avalia o trincamento do pavimento, já o IQM avalia os tipos de trincas existentes. Dessa maneira, há uma maior ponderação em relação aos elementos e, além disso, enquanto o ICM analisa a condição de conservação somente pela drenagem, roçada e sinalização, o IQM analisa avaliando a limpeza da faixa de domínio, caiação, drenagem, roçada, limpeza de dispositivos de drenagem e sinalização.

Assim, no mês de outubro de 2022, o ICM obteve 18% dos trechos avaliados como sendo “péssimo”, ou seja, 25 quilômetros dentre os 136 quilômetros avaliados, onde grande parte desses quilômetros se concentram entre o km 93,4 ao km 77 (sentidos crescente e decrescente). No entanto, o IQM mensurou esse trecho (km 93,4 ao km 77) como sendo “ruim”. A divergência entre as avaliações desses dois indicadores se deve ao fato da drenagem e roçada serem avaliadas como “regular” no ICM para toda a rodovia. Dessa maneira, constatou-se que essa avaliação é o que mais influenciou no valor alto do resultado do ICM para este trecho em questão, fazendo com que este indicador obtivesse um valor elevado para a avaliação “péssima”.

Por conseguinte, é importante registrar que o serviço de roçada foi avaliado como sendo “regular” para todo o trecho da rodovia analisada nesse trabalho (km 0 ao km 93,4 - sentidos crescente e decrescente) para o indicador ICM para o mês de outubro.

Em relação aos trechos avaliados como “regular”, o IQM obteve uma porcentagem de 34%, trechos esses que estão localizados, principalmente, entre o km 0 e o km 51 (sentido crescente). Além disso, os fatores que mais influenciaram nesse resultado foram a existência de fissuras nas placas de concreto do pavimento rígido e, no âmbito da conservação, foram seus elementos de drenagem estarem parcialmente caiados e sua sinalização estar desgastada. Em contrapartida, o ICM avaliou apenas 11% dos trechos como “regular”, ou seja, foram 15 quilômetros dos 136 quilômetros analisados. Eles também se concentraram entre o km 0 e o km 51, entretanto, diferentemente do IQM, a maioria dos quilômetros desse trecho foram avaliados como “bom”.

Por fim, para os dois indicadores, o trecho situado entre o km 51 e o km 0 (sentido decrescente) foi avaliado, em sua maior parte, como “bom”. Outro trecho que também ganhou destaque foi o do km 0 ao km 51 (sentido crescente), tal como explicado no parágrafo anterior. Vale ressaltar, que ambos os trechos foram recentemente duplicados.

Análise Comparativa entre ICM e IQM no Mês de Novembro

Para o mês de novembro de 2022 pode-se observar, conforme ilustra a Tabela 5, que tanto o ICM quanto o IQM ponderaram uma melhora no estado de conservação do trecho da BR-101/Norte, visto que houve uma redução dos percentuais de “péssimo” para o ICM e de “ruim” para o IQM, aumentando os percentuais de “regular”. Isso é justificado através da fórmula empírica desses dois indicadores, que apresenta o índice de pavimentação (*IP*) representando 70% dos seus valores. É importante ressaltar que o mês de novembro foi marcado pela execução dos serviços de reparos localizados e de correção de defeitos, promovendo uma melhora no pavimento e, por conseguinte, uma melhora nos trechos analisados, sobretudo, do km 93,4 ao km 77 (sentidos crescente e decrescente), trechos onde predominaram a execução desses serviços.



DOI: 10.29327/1430212.49-106

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MANUTENÇÃO DO TRECHO DA BR101/NORTE
NO ESTADO DE SERGIPE EMPREGANDO O ÍNDICE DE QUALIDADE DA MANUTENÇÃO (IQM):
ESTUDO DE CASO**

Tabela 5. Valores do ICM e do IQM no mês de novembro.

ANÁLISE COMPARATIVA		
AVALIAÇÃO	ICM	IQM
PÉSSIMO	10%	0%
RUIM	26%	12%
REGULAR	13%	39%
BOM	51%	49%

A realização desses serviços de conservação no pavimento influenciou na diminuição da porcentagem da avaliação classificada como “péssimo” para o ICM que diminuiu 8%, quando comparado ao resultado do mês de outubro (passando de 18% para 10%). Por conseguinte, houve um aumento de 8% na avaliação “ruim” (passando de 18% para 26%). Já para o IQM, percebe-se que houve uma diminuição dos quilômetros avaliados como “ruim” e um aumento dos avaliados como “regulares”. Dessa maneira, para ambos os indicadores, a melhoria do estado de conservação e pavimentação ocorrida nesses trechos da BR-101/Norte foi fruto dos serviços de manutenção executados no pavimento que ocasionaram a diminuição do número de painéis e o aumento do número de remendos. Porém, vale lembrar que o peso de ponderação das painéis é maior do que o peso de ponderação de remendos na fórmula do IP.

Em relação à avaliação classificada como “bom”, os resultados desses indicadores foram próximos. Como já descrito na análise do mês de outubro, a diferença entre os indicadores é que o IQM avalia o trecho do km 0 ao km 51 (sentido crescente) como sendo em sua maioria “regular”, enquanto o ICM avalia como “bom”. Portanto, não houveram mudanças expressivas nessa nova análise, pois nesse trecho só foram executados serviços relacionados a conservação da via, ou seja, limpeza de faixa de domínio, de dispositivos de drenagem, roçada e capina, o que tornou a avaliação semelhante à do mês passado. A mesma análise aplica-se para o trecho do km 51 ao km 0 (sentido decrescente) que foi avaliado como “bom” para os dois indicadores.

Análise Comparativa entre ICM e IQM no Mês de Dezembro

Para o mês de dezembro de 2022, conforme ilustra a Tabela 6, tanto o ICM quanto o IQM refletiram uma piora no estado de conservação desse trecho da BR-101/Norte, uma vez que houve um aumento do percentual de “péssimo” e de “ruim” para o IQM e de “péssimo” para o ICM, e uma diminuição do percentual de “bom” para o ICM e do percentual de “regular” para o IQM. A principal causa que gerou essa avaliação para os dois índices é a piora no pavimento do km 93,4 ao km 77 (sentidos crescente e decrescente), já que nas avaliações dos dois indicadores foram apontadas um aumento no número de painéis nesse trecho.

Tabela 6. Valores do ICM e do IQM no mês de dezembro.

ANÁLISE COMPARATIVA		
AVALIAÇÃO	ICM	IQM
PÉSSIMO	18%	1%
RUIM	21%	15%
REGULAR	14%	34%
BOM	47%	50%



O problema acima relatado influenciou no aumento da porcentagem do trecho classificado como “péssimo” no ICM que aumentou 8%, quando comparado ao resultado do mês de novembro (passando de 10% para 18%). Por conseguinte, houve uma diminuição de 5% na avaliação “ruim” (passando de 26% para 21%). Já para o IQM, percebe-se que houve o surgimento do trecho avaliado como “péssimo” (km 79), um aumento dos quilômetros avaliados como “ruim” e uma diminuição dos “regulares”. Assim sendo, em ambos os indicadores houve evidências de que a piora do estado de conservação do trecho estudado da BR-101/Norte foi em razão do aumento do número de painéis no pavimento, cujo indicador é o de maior ponderação no cálculo do valor do IP.

Por fim, no que diz respeito ao trecho avaliado como “bom”, o resultado do ICM e do IQM foram próximos. Entretanto, quando esses valores são comparados com os obtidos para o mês anterior (novembro de 2022), percebe-se que no ICM houve uma diminuição de 4% para essa avaliação, enquanto para o IQM houve um aumento de 1%. No ICM essa piora é reflexo de o número de trechos avaliados como “bom” ter diminuído de 69 trechos para 64 trechos e isso foi percebido principalmente do km 51 ao km 0, onde foi avaliado um maior número de painéis por quilômetro. Já no IQM, a melhora de 1% na avaliação “bom” é devido ao aumento do número de trechos avaliados com essa categorização (passando de 66 para 68 trechos) motivado pelo serviço de caiação realizado na rodovia.

CONCLUSÃO

Com o estudo realizado no trecho da BR-101/Norte, localizada no estado de Sergipe, foi possível constatar que é necessário realizar a manutenção de uma rodovia, visto que é por meio dessa prática que se evita o agravamento de problemas já existentes, recupera-se a rodovia, conservando as suas características originais, e realiza-se os serviços de conservação, como roçada costal, capina e limpeza de dispositivos de drenagem. Por conseguinte, fica evidente a importância de realizar a avaliação de uma rodovia, a fim de compreender o seu real estado de conservação e a qualidade dos serviços que estão sendo executados nela continuamente.

A ponderação do IQM ao longo dos três meses analisados mostrou que o maior percentual do resultado desse índice foi o dos trechos avaliados como “bom”, ou seja, trechos que possuíam um bom estado de pavimentação e conservação ($ICM < 30$). O segundo lugar ficou com os trechos avaliados como “regulares”, que foram aqueles que possuíam um número intermediário de defeitos no pavimento e são marcados por um bom estado de conservação ($30 < ICM < 50$). Já o terceiro lugar ficou com os trechos avaliados como “ruim”, isto é, que possuíam um pavimento marcado, principalmente, por um número elevado e intermediário de defeitos ($50 < ICM < 70$). E, no último lugar, ficou o trecho avaliado como “péssimo” que somente apareceu na avaliação de dezembro e que possuía um pavimento marcado por um número elevado de defeitos no pavimento ($ICM > 70$).

Ademais, ao realizar a avaliação do IQM foi possível perceber que no tocante ao Índice de Conservação (IC) da rodovia, os serviços de capina, roçada, limpeza de faixa de domínio e limpeza de elementos de drenagens eram realizados cotidianamente. Dessa forma, esses indicadores influenciaram positivamente no resultado do IQM.

Ainda sobre o IC, no que se refere ao indicador de sinalização, percebeu-se que era necessário haver o reforço da pintura da sinalização horizontal do pavimento em boa parte dos trechos da rodovia avaliada, bem como a implantação de sinalizações verticais faltantes ou a substituição daquelas cujas refletâncias não se encontram no estado adequado. No que diz respeito a caiação constatou-se que este serviço só era executado quando realmente havia a necessidade de cair os



DOI: [10.29327/1430212.49-106](https://doi.org/10.29327/1430212.49-106)

**AValiação da Qualidade da Manutenção do Trecho da BR101/NORTE
NO ESTADO DE SERGIPE EMPREGANDO O ÍNDICE DE QUALIDADE DA MANUTENÇÃO (IQM):
ESTUDO DE CASO**

elementos de drenagem. No entanto, esta tarefa poderia ser realizada periodicamente. Dessa maneira, caso essas práticas fossem implementadas, os valores do IC seriam mais baixos e, por conseguinte, os resultados obtidos para o IQM seriam mais satisfatórios.

Destaca-se que as medidas de restauração dos pavimentos devem ser tomadas sobretudo nos trechos avaliados como “ruim” e “péssimo” e, até mesmo, nos “regulares”. Os trechos avaliados como “bom” estavam localizados, em sua grande parte, na pista duplicada que possui pavimento rígido, cujos problemas devem ser resolvidos com a recuperação das placas de concreto. Assim, com a diminuição dos defeitos no pavimento haverá uma melhora do valor do IQM e, conseqüentemente, uma mudança expressiva na qualidade da manutenção da rodovia.

Comparando os resultados do ICM aos do IQM foi possível perceber as diferenças da avaliação de cada índice, pois no primeiro há uma maior generalização da situação da rodovia, enquanto no segundo há uma avaliação mais específica. Outro ponto levantado é que a avaliação de cada índice é sensorial, já que mesmo havendo os critérios, um fator que influencia é a análise do avaliador, sobretudo, na avaliação dos indicadores de conservação, que exige um certo “feeling”.

Dessa forma, recomenda-se a realização dos serviços de manutenção das vias periodicamente, atentando-se para os problemas que as rodovias são acometidas, a fim de manter a qualidade das mesmas e o conforto aos seus usuários.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao DNIT e ao Instituto Federal de Sergipe (IFS), Campus Aracaju, por todo o suporte oferecido no desenvolvimento do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2023 reforça a importância de maior investimento na malha rodoviária**. 29 de novembro de 2023. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/pesquisa-cnt-de-rodovias-2023-refora-a-importancia-de-maior-investimento-na-malha-rodoviria>. Acesso em: 01/06/2024.

DNIT. **Manual de Conservação Rodoviária**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005. 564p. (IPR. Publ., 710). Acesso em: 13/07/2022.

_____. **Instrução de Serviço N° 10 de setembro de 2017**. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/central-de-conteudos/instrucoes-normativas/instrucoes-de-servicos/2017/instrucao-de-servico-no-10-2017-colegiada-idade-de-condicao-da-manutencao-icm.pdf>. Acesso em: 24/10/2022.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **ICM, rodovias federais quilômetro por quilômetro**. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-terrestre_antigo/icm. Acesso em: 21/10/2022.

SENÇO, Wlastemiler. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 1. ed., PADRÃO, 2008.

SILVA, Leandro Marzari. **Controle de qualidade aplicado a inspeção visual de pavimentos flexíveis urbanos**. 2017. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2017.

VIA 101. **BR-101 Sergipe: Tudo sobre a rodovia BR-101**. 2022. Disponível em: <https://via101.com.br/br-101-sergipe/>. Acesso em: 22/10/2022.



CONSERVA PRO: NOVAS ABORDAGENS DOS CONTRATOS DE MANUTENÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA DO DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS – DER/MG

Diogo Mendes Cardinali Pinheiro¹; Gibran Alvim Lacerda¹; Ivan Elídio de Pinho Tavares¹; Marcelo dos Santos Rodrigues¹; Marcelo José Cândido Rocha¹ & Raul Coelho de Sousa¹

RESUMO

O presente trabalho visa apresentar um estudo de caso, ainda em andamento, do DER-MG relacionado aos contratos de conservação rodoviária do estado de Minas Gerais, que possui a maior malha rodoviária do país, demonstrando as dificuldades, as falhas e os êxitos adquiridos no decorrer dos anos, considerando os recursos financeiros disponíveis em cada época e as particularidades de cada região do estado. O trabalho faz a apresentação da malha rodoviária do estado, suas características gerais, as definições e conceitos adotados para elaboração e gerenciamento da conservação rodoviária além das experiências já vividas com a conservação até chegar no modelo atual de contrato, o Conserva Pro, que visa além de manter a malha conservada com segurança e trafegabilidade adequada para o usuário, também melhorar de forma preventiva e gradual o estado do pavimento que até então vinha recebendo prevalentemente apenas serviços corretivos.

PALAVRAS-CHAVE: (conservação; pavimento; contrato).

ABSTRACT

This work aims to present a case study, still in progress, of DER-MG related to road conservation contracts in the state of Minas Gerais, which has the largest road network in the country, demonstrating the difficulties, failures and successes acquired in the over the years, considering the financial resources available at each time and the particularities of each region of the state. The work presents the state's road network, its general characteristics, the definitions and concepts adopted for the elaboration and management of road conservation in addition to the experiences already lived with conservation until arriving at the current contract model, Conserva Pro, which aims beyond to maintain the network safely and with adequate traffic for the user, also to preventively and gradually improve the condition of the pavement, which until then had predominantly received only corrective services.

KEY WORDS: (conservation; pavement; contract).

¹ Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, diogo.pinheiro@der.mg.gov.br; gibran.lacerda@der.mg.gov.br; ivan.tavares@der.mg.gov.br; marcelo.rodrigues@der.mg.gov.br; marcelo.rocha@der.mg.gov.br; raul.coelho@der.mg.gov.br



DOI: [10.29327/1304307.48-1](https://doi.org/10.29327/1304307.48-1)

CONSERVA PRO: NOVAS ABORDAGENS DOS CONTRATOS DE MANUTENÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA
DO DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS – DER/MG

INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa apresentar um estudo de caso, ainda em andamento, referente à última modelagem contratual elaborada pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais – DER/MG, para manutenção da malha rodoviária estadual.

Ao longo de quase 80 anos de existência, o DER/MG adotou diversos modelos contratuais, obtendo-se acertos e aprendizagens.

Este último arranjo contratual é chamado de Conserva Pro e contempla os acertos evidenciados nos contratos anteriores, bem como traz inovação de novas obrigações e regras contratuais.

O estudo de caso está em andamento, pois os primeiros contratos do Conserva Pro tiveram ordem de início em março de 2024. Atualmente, das 40 regionais do DER/MG, 14 já migraram para o modelo citado.

APRESENTAÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA ESTADUAL

De acordo com o último levantamento da malha rodoviária estadual, publicado pelo DER/MG em outubro de 2023, o Estado de Minas Gerais possui 20.175,42 km de rodovias pavimentadas, desconsiderando as rodovias municipais, concessões estaduais, federais e aquelas de responsabilidade do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT.

Vários fatores levaram o Estado de Minas Gerais a possuir a maior malha rodoviária do País. Dentre eles, destacam-se: sua grande extensão territorial, cuja área possui 580 mil km²; sua posição geográfica dentro da região sudeste, historicamente desenvolvida economicamente, além de ser o estado com o maior número de municípios (853), em comparação com as outras unidades da federação. Desta forma, para o gerenciamento de todo esse passivo o DER/MG conta, desde a década de 90, com 40 Coordenadorias Regionais, cujo raio de atuação foi distribuído pelo território mineiro de forma a cobrir todas as regiões do Estado.

É importante destacar que as dimensões territoriais do Estado em conjunto com as variações climáticas e as características geomorfológicas, trazem grandes desafios no que diz respeito às condições funcionais das rodovias. Nas regiões leste e sul, por exemplo, predomina o bioma de Mata Atlântica, onde o relevo é extremamente montanhoso, implica na necessidade de utilização de muitos cortes e aterros na concepção das rodovias. Por outro lado, a região oeste do Estado é marcada pela grande incidência do cerrado, cuja área possui característica mais plana. Já ao norte, o bioma predominante é a caatinga, onde o clima é bastante seco em função da pouca incidência de chuvas, e o relevo é marcado pela recorrência de planícies.

Em linhas gerais, as variações climáticas e do relevo, dentre tantas outras características que compõem a superfície geográfica do Estado, fazem com que a engenharia rodoviária como um todo seja algo complexo e desafiador. Mesmo porque, a disponibilidade de materiais utilizados na execução de obras rodoviárias influencia diretamente na sua manutenção, tendo em vista o prolongamento da sua vida útil das rodovias mineiras.

A DEFINIÇÃO DOS CONCEITOS DE MANUTENÇÃO E CONSERVAÇÃO

Primeiramente, faz-se necessário definir os principais conceitos na área da manutenção rodoviária, como o melhoramento, conservação, recuperação, restauração, reabilitação, revitalização etc.



Segundo o Manual de Conservação Rodoviária – DNIT, Publicação IPR-710, a Manutenção Rodoviária compreende um processo sistemático a que, de forma contínua, deve ser submetida uma rodovia, no sentido de que esta, de conformidade com suas funções e magnitude de tráfego, venha a oferecer ao usuário, permanentemente, um tráfego econômico, confortável e seguro.

Ainda conforme o Manual, a Manutenção Rodoviária se consubstancia através de ações sistemáticas e programadas que podem ser enquadradas nos grupos básicos a seguir.

Conservação Corretiva Rotineira

É o conjunto de operações de conservação que tem como objetivo reparar ou sanar um defeito e restabelecer o funcionamento dos componentes da rodovia, propiciando conforto e segurança aos usuários.

Conservação Preventiva Periódica

É o conjunto de operações de conservação realizadas periodicamente com o objetivo de evitar surgimento ou agravamento de defeitos; trata-se de tarefas requeridas durante o ano, cuja frequência de execução depende do tráfego, topografia e clima. Ex: roçada, fechamento de trincas no pavimento, dentre outros.

Conservação de Emergência

É o conjunto de operações, que com o serviço ou obras necessárias para reparar, repor, reconstruir ou restaurar trechos ou estrutura da rodovia, que tenham sido seccionados, obstruídos ou danificados por um evento extraordinário ou catastrófico, ocasionando à interrupção do tráfego da rodovia. Remoções de barreiras e recuperações de erosões são bons exemplos de conservação de emergência.

Restauração

É o conjunto de operações destinadas a restabelecer o perfeito funcionamento de um bem determinado ou avariado, e restabelecer, na íntegra, suas características técnicas originais. Envolve, portanto um conjunto de medidas destinadas a adaptar a rodovia, de uma forma permanente, às condições de tráfego atuais e futuras, prolongando seu período de vida.

Melhoramentos

É o conjunto de operações que acrescentam à rodovia existente, características novas, ou modificam as características existentes.

Os grupos anteriores se remetem a todo o sistema da rodovia, incluindo a drenagem, sinalização, faixa de domínio etc.

Em termos de pavimentos, existem grupos específicos, conforme relacionado a seguir.



[DOI: 10.29327/1304307.48-1](https://doi.org/10.29327/1304307.48-1)

CONSERVA PRO: NOVAS ABORDAGENS DOS CONTRATOS DE MANUTENÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA
DO DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS – DER/MG

Recuperação de Pavimentos

É um processo a ser ordinariamente aplicado a um pavimento desgastado, com o objetivo de que sejam restabelecidas as suas adequadas características técnicas.

Restauração de Pavimentos

Aplicados a pavimentos que ainda se encontram próximos os estágios finais do ciclo de vida.

Reabilitação de Pavimentos

É um processo a ser adotado a um pavimento que já ultrapassou o estágio final do ciclo de vida correspondente e apresenta anomalias com tendência irreversíveis.

Já no âmbito do DER/MG, a nomenclatura é similar e se entende a Manutenção Rodoviária como todo o processo que diz respeito à gestão da rodovia e sua faixa de domínio. Os grupos são conforme a seguir:

- Conservação Rotineira;
- Conservação Periódica;
- Serviços de Urgência;
- Melhoramentos.

Em termos de pavimentos, os grupos e nomenclaturas são as mesmas, a saber: Recuperação Funcional, Restauração e Reabilitação.

Já a título de exemplificação, para o Eng.º Dr. Regis Martins Rodrigues, seu Livro Engenharia de Pavimentos – Parte 2, Gerência de Pavimentos, é definida a Manutenção como qualquer intervenção que afeta diretamente ou indiretamente o nível de serventia atual e/ou o desempenho futuro do pavimento, podendo ser agrupada nos seguintes grupos.

- Conservação Rotineira;
- Conservação Leve;
- Conservação Pesada;
- Restauração;
- Reconstrução.

EXPERIÊNCIAS NA MANUTENÇÃO DA MALHA ESTADUAL RODOVIÁRIA DO DER/MG

Manutenção por Execução Direta

O DER/MG foi fundado em 04 de maio de 1946 e à partir de então a manutenção rodoviária se dava através de execução direta, onde se faziam com equipamentos, maquinários e mão de obra próprias. A partir da década de 70, os serviços de manutenção passaram gradualmente a serem terceirizados. Atualmente, na conservação da malha rodoviária estadual, não existe a opção de execução direta, ficando toda a conservação por conta de empresas contratadas.

Os modelos de contrato, resumidamente, eram chamados contratos por “preços unitários” e “contrato por km”.



Serviços por demanda (unitário)

Estes serviços de conservação se dão por contratação através de licitações, onde que até o ano de 2016 se adotava o formato de serviços por demanda e pagos por preço unitário de cada serviço contratado.

Dentre os fatores que são prós a este modelo de contrato podemos citar a flexibilidade para se definir quais serviços serão executados e a limitação dos gastos por questões orçamentárias.

Já entre os fatores negativos citamos a dificuldade de mobilização, considerando a dinâmica dos serviços e o fato de que a empresa nem sempre terá um horizonte distante dos serviços que serão executados. Percebe-se uma preferência da empresa contratada em alguns serviços em detrimento de outros, cujo preço unitário não seja interessante. Ainda dentre os fatores negativos, as variações mensais dos gastos geravam uma dificuldade na previsão orçamentária. Além disso, citamos também a dificuldade da fiscalização de evidenciar e indicar todos os serviços e locais que se deve atuar, considerando o baixo número de funcionários nas regionais.

Serviços de conservação por quilometro (km)

Observando as novas necessidades, e o baixo número de servidores, em 2016 começou um novo formato de contratação da conservação rotineira da malha pavimentada do Estado de Minas Gerais. Criou-se um contrato com objetivo de tornar a empresa proativo, com sua remuneração constante em uma “cesta de serviços” previsto.

Constavam os serviços de roçada, tapa-buraco, limpeza de drenagem, capina, sinalizações e as desobstruções de vias. A contratada deveria manter todos os serviços dentro do padrão de desempenho preestabelecido no contrato.

O pagamento dos serviços é feito por quilometro de rodovia pavimentada conservada, onde o “km” que não atender algum dos serviços da cesta não seria objeto de medição.

O contrato além da conservação rotineira também possuía outros diversos itens para que a empresa contratada pudesse tratar de demandas supervenientes que pudessem aparecer, como erosões e recuperações maiores no pavimento, onde estes serviços eram pagos de forma unitária.

Dentre os fatores positivos desta modelagem podemos citar a proatividade, em que a empresa contratada já atua sabendo o que tem de fazer, sem necessidade de a fiscalização demandar a todo momento serviços rotineiros de conservação. Além disso, mantendo o padrão de desempenho esperado a empresa receberia um valor por km certo e por isso, havia regularidade dos pagamentos e com isso uma segurança nas garantias orçamentária e nos pagamentos além de uma maior previsibilidade para que a empresa se mantenha mobilizada.

Já dentre os fatores negativos, citamos a dificuldade da aferição do desempenho de alguns serviços, como a retrorrefletância da sinalização horizontal, por falta de equipe e equipamento necessário. Outro fator negativo destes contratos era a falta previsibilidade de maiores intervenções no pavimento levando a uma degradação exponencial dele, por se tratar apenas de serviços corretivos.

CONSERVA PRO

Observando toda expertise adquirida nos anos anteriores em conjunto com uma maior disponibilidade financeira para se investir na malha rodoviária do estado, em 2023 se iniciou uma nova modelagem de contrato unindo o que deu certo e solucionando o que não deu, para que se



DOI: [10.29327/1304307.48-1](https://doi.org/10.29327/1304307.48-1)

CONSERVA PRO: NOVAS ABORDAGENS DOS CONTRATOS DE MANUTENÇÃO DA MALHA RODVIÁRIA
DO DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS – DER/MG

pudesse ter um contrato que além de manter a conservação da malha pudesse também tratar o pavimento de forma preventiva.

A solução foi unir em um mesmo contrato os 2 modelos existentes: a remuneração por serviços “unitários” e por “km”.

Além disso, traz também uma remuneração específica para reparar os defeitos do pavimento abrangendo serviços preventivos com fresagem, remendo profundo e capa asfáltica. Este novo modelo contratual, que abrange metodologias anteriores (“unitário” + “km”) com a previsão de recursos para reparo dos defeitos de pavimento foi nomeado de Conserva Pro.

Já foi relatado também que a malha rodoviária do DER/MG está subdividida em 40 regionais. Até o presente momento, foram lançados 2 editais para contratação de empresas no Conserva Pro.

- Edital nº 90 de 2023 com as regionais de Barbacena, Araxá, Patos de Minas, Governador Valadares, Uberaba, Pirapora e Abaeté;
- Edital nº 134 de 2023 com as regionais de Pará de Minas, Montes Claros, Brasília de Minas, Oliveira, Jequitinhonha, Teófilo Otoni e Arinos.

Portanto, até o momento, 14 regionais executam a manutenção de sua malha rodoviária através dos contratos do Conserva Pro. Há previsão é as demais regionais também migrarem para o Conserva Pro na medida que os atuais contratos forem se extinguindo.

Os detalhes referentes a esse novo modelo de conservação serão detalhados a seguir.

Serviços por demanda (unitário) no Conserva Pro

Os serviços executados sob demanda, como o próprio nome sugere, são aqueles serviços cuja intervenção ocorre na medida em que surgem na malha viária. Obviamente, a urgência na intervenção deverá obedecer a certos critérios, dentre eles se destacam: segurança do usuário, risco geológico e nível de serviço da rodovia. Seja um abatimento no pavimento, erosão nos bordos da rodovia, ou mesmo um sistema de drenagem com potencial para evoluir para erosão, é sempre importante definir uma solução técnica que supra paliativamente ou definitivamente aquela demanda.

Um serviço por demanda recorrente nas rodovias localizadas em regiões montanhosas é o escorregamento de taludes, cuja incidência geralmente está associada ao período chuvoso e ao sistema de drenagem ineficiente. Quando ocorre queda de solo saturado (barreira) a montante da rodovia, obstruindo a pista total ou parcialmente, é necessário removê-lo imediatamente, devolvendo a trafegabilidade da via. No entanto, quando ocorre o mesmo evento a jusante da rodovia, é preciso avaliar as condições do talude, as causas e o imediato isolamento do local. Em ambos os casos cabe um plano de ação efetivo de serviço não rotineiro a fim de sanar o problema, mesmo que seja, num primeiro momento, de forma paliativa. No caso do rompimento de um bueiro de grota, com risco eminente de interrupção de tráfego, o serviço por demanda torna-se mais complexo e exige mais cautela nos serviços de recuperação.

É necessário avaliar e estudar as causas, de modo que o serviço seja executado de forma definitiva, sempre levando em conta a dimensão técnica e orçamentária da obra. Em linhas gerais, os serviços por demanda exigem planejamento para serem executados no tempo e no período correto, sempre levando em conta o cronograma financeiro do contrato, bem como a disponibilidade orçamentária do órgão.



Por outro lado, do ponto de vista técnico, os novos contratos inclusos no Conserva Pro, poderão sanar grande parte dos serviços de conservação por demanda, haja vista que os antigos contratos eram mais acanhados financeiramente, dando prioridade aos serviços rotineiros.

Serviços de conservação por quilometro (km) no Conserva Pro

Como mencionado anteriormente, a partir do ano de 2016 os contratos de manutenção trouxeram o conceito de remuneração por “km”. Nesta concepção, a conservação rotineira funcionava como uma “cesta de serviços” da qual a empresa contratada deveria executá-los e atender a todos os parâmetros de desempenho para fazer jus ao recebimento integral da remuneração referente às rodovias pertencentes aquele contrato em quilômetros.

Além de manter os itens básicos das modelagens contratuais anteriores (roçada, tapa-buraco, capina e limpeza de dispositivos de drenagem), o Conserva Pro inova ao incorporar o serviço de “limpeza mecanizada dos bordos (raspagem de bordo de pista)” ao pacote de serviços a serem executados rotineiramente.

Tal serviço tem como objetivo proporcionar uma limpeza mais eficiente dos bordos das pistas nos locais em que não há dispositivos de drenagem.

Outra inovação foi a criação de uma planilha de gestão e controle para lançamento junto à medição destes itens que compõem a cesta de serviços de conservação.

Ocorre que, nos modelos de contratos antigos, quando o prestador descumpria a execução de algum serviço que compõe a gama de manutenção rotineira em algum km dentro da extensão de uma rodovia, todo aquele km era cortado da medição, o que gerava indisposição e questionamentos por parte das empresas contratadas.

Ou seja, ao se constatar o não atendimento da roçada, por exemplo, o contrato permitia a glosa, independente do pavimento estar em perfeito estado.

Já a mencionada planilha de controle do Conserva Pro considera-se os pesos de cada item que compõe a cesta de serviços rotineiros dentro da extensão da malha viária. Assim, caso algum serviço não seja executado de maneira satisfatória, somente este item de serviço deverá ser ‘penalizado’ levando em consideração cada rodovia pertencente aquele contrato. Isso facilita o controle de serviços efetivamente executados além de trazer mais clareza e transparência na medição dos serviços rotineiros.

A seguir, apresentamos na Tabela 1 a Planilha de Glosa constante no Termo de Referência para o Conserva Pro. No caso em questão, está preenchida com as informações prévias da 35ª Unidade Regional do DER/MG – Abaeté.

O Termo de Referência especifica uma meta a ser cumprida nos primeiros meses do contrato.

- 20% da malha no 1º mês;
- 40% da malha no 2º mês;
- 70% da malha no 3º mês;
- 100% da malha no 4º mês.

Conforme pode ser observado, a empresa contratada executou 25,58% no 1º mês, cumprindo a meta proposta. Com isso se torna claro os trechos que necessitam de melhorias e o qual serviço de cada trecho necessita ser atacado.



DOI: 10.29327/1304307.48-1

CONSERVA PRO: NOVAS ABORDAGENS DOS CONTRATOS DE MANUTENÇÃO DA MALHA RODVIÁRIA
DO DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS – DER/MG

Tabela 1: Tabela para os item conservação por quilômetro "km" (Fonte: Autor, 2024)

35ª URG - ABAETÉ - CHECKLIST

TRECHOS	Planilha de medição do componente de conservação por km								MEDIÇÃO N.º 2	MÊS/ANO	ma/24	
	Rodovim	Extensão	Limp. de bordo	Ranetas	Tapa Duraco	Capins	Limpeza dis. drenagem	Reparo disp. drenagem	Limpeza de bueiros	Trecho executado	Gloss	% medida
	PESO		0,02516	0,30314	0,37952	0,01295	0,09297	0,06915	0,12731		1,00	
AGROPÊU - ENTR. MG 420 / MG 164 (A) (POMPÊU)	MG 060	2,900			100%					1,10	1,799	39,0%
FINAL PER URB ABAETÉ - RIBERÃO SÃO VICENTE	MG 060	15,400			100%					5,04	9,555	39,0%
RIBERÃO SÃO VICENTE - FATOS DE ABAETÉ	MG 060	5,200			100%					1,97	3,226	39,0%
FATOS DE ABAETÉ - INÍCIO PER URB PAINEIRAS	MG 060	10,500			100%					3,98	6,515	39,0%
FINAL PER URB PAINEIRAS - BIQUINHOS	MG 060	16,200								0,00	16,200	0,0%
ENTR. MG 060 (B) / MG 420 (POMPÊU) - RIO PARÁ	MG 164	16,100		50%	100%					8,55	7,549	53,1%
RIO PARÁ - KM 90,6 Fº MARTINHO CAMPOS	MG 164	9,800		100%	100%					6,69	3,110	69,3%
ENTR BR 352 - ENTR. UMG 793	MG 176	5,100			100%					1,94	3,164	39,0%
ENTR UMG 793 - ENTR. ACESSO B Fº QUARTEL GERAL	MG 176	14,500								0,00	14,500	0,0%
ENTR. ACESSO (B) Fº QUARTEL GERAL - ENTR. Fº DORES DO INDAIÁ (A)	MG 176	20,800			50%					3,95	16,853	19,0%
ENTR. Fº DORES DO INDAIÁ (A) - ENTR. Fº DORES DO INDAIÁ (B)	MG 176	6,400			100%					2,43	3,971	39,0%
ENTR. Fº DORES DO INDAIÁ (B) - ENTR. Fº ESTRELA DO INDAIÁ	MG 176	5,900			100%					2,24	3,661	39,0%
ENTR. Fº ESTRELA DO INDAIÁ - ENTR. MG 235	MG 176	11,500			100%					4,36	7,136	39,0%
ENTR. MG 235 - ENTR. DR 262 (DIV 20 ORG) LUZ	MG 176	10,600			100%					7,06	11,541	39,0%
ENTR. UMG 794 (A) Fº ESTRELA INDAIÁ - ENTR. UMG 794 (B)	MG 235	0,900								0,00	0,900	0,0%
ENTR. UMG 794 (B) - SERRA DA SAUDADE	MG 235	12,200								0,00	12,200	0,0%
FINAL PER URB. CEDRO DO ABAETÉ - ENTR. UMG 793	MGC352	25,400			50%					4,82	20,580	19,0%
ENTR. UMG 793 - INÍCIO PER URB. ABAETÉ	MGC352	6,500			100%					2,47	4,033	39,0%
BIQUINHOS - RIBERÃO D. JANA	MG 415	16,300								0,00	16,300	0,0%
RIBERÃO D. JANA - MORADA NOVA DE MINAS	MG 415	10,900								0,00	10,900	0,0%
ENTR. BR 040 Fº PARADPEBA - RIO PARADPEBA	MG 420	9,900			100%					3,76	6,143	39,0%
RIO PARADPEBA - ENTR. MG 060 (POMPÊU)	MG 420	30,000			100%					12,52	20,476	39,0%
ENTR. MGC352 - ENTR. MG 176	UMG 793	5,300			100%					2,01	3,289	39,0%
ENTR. MG 176 - ENTR. MG 235 (A)	UMG 794	15,200								0,00	15,200	0,0%
ENTR. MG 235 (B) - ESTRELA DO INDAIÁ	UMG 794	2,800								0,00	2,800	0,0%
ENTR. MG 060 / BR 352 - ABAETÉ (FONTE)	MG 90035	2,800			100%					1,06	1,737	39,0%
TOTAL		300,100								76,76	223,34	25,59%

VALOR MEDIÇÃO	
GLOSS ENCONTRADA	223,34
EXTENSÃO TOTAL DA MALHA	300,10
TOTAL A SER MEDIDO	76,76



Componente de reparo dos pavimentos no Conserva Pro

As experiências anteriores evidenciaram grande necessidade de se fazer algumas recuperações de pavimento, tendo em vista a má qualidade da rodovia e principalmente a vida útil de projeto já superada. Porém, a recuperação funcional do pavimento é um serviço abrangente, de contrato específico e demandaria um alto investimento por parte do Estado. Assim, no intuito de garantir uma intervenção mais robusta na recuperação de pavimento, foi introduzido no programa Conserva Pro o serviço de Reparo de Defeitos do pavimento, cujo objetivo é justamente dar ao contrato a condição de recuperar aquele trecho da rodovia onde há muitas patologias. Com isso, o Conserva Pro prevê quantitativos para:

- Fresagem e Recomposição;
- Remendo Profundo;
- Capa Asfáltica;
- Microrrevestimento.

Os quantitativos desses serviços possibilitam a atuação em média de 10% da malha rodoviária pavimentada de cada unidade regional. O objetivo não é substituir projetos específicos de Recuperação, Restauração ou Reabilitação, mas sim possibilitar a recuperação pontual de determinados trechos, evitando uma recuperação emergencial mais dispendiosa.

QUESTÕES JURÍDICAS E OUTROS DESAFIOS

Os itens por demanda (unitário) e conservação por quilômetro (km) já ocorriam em contratos anteriores e é uma solução pacificada dentro do DER/MG. A criação do item Reparo dos Pavimentos, porém, se apresentou desafiadora. A princípio a remuneração deste item deveria ser conforme km medido de serviço executado, porém, o Departamento Jurídico do DER/MG orientou que havia de necessidade de um projeto específico para todos os reparos, bem como a planilha orçamentária de cada local. Porém, em função do prazo que isso demandaria, e levando em conta que os contratos vigentes estavam próximos ao vencimento, tornou-se necessária a adequação deste serviço para que a sua unidade de medida não seja o km, mas sim a unidade “mês”.

Portanto, os editais não apresentam os locais que serão objeto de intervenção, mas sim todo o quantitativo previsto para cada regional. A empresa contratada, em conjunto com o DER/MG, definirão os locais e o cronograma de execução. Ainda é desejo que a unidade de medida seja o “km”, porém, ainda demandará ajustes na logística para que os projetos possam ser realizados em conjunto com o Edital.

CONCLUSÃO

Mesmo diante dos desafios impostos pela dimensão da malha rodoviária estadual de Minas Gerais, o DER/MG vem aprimorando a gestão contratual relativa à manutenção da malha rodoviária, através de inovações contratuais e novas metodologias de fiscalização. A criação do Conserva Pro agrega os resultados positivos de modelagens anteriores, como a remuneração por demanda (unitário) e a conservação por quilômetro (km) além de criar o componente do serviço de reparo de defeitos de pavimentos, trazendo mais opções de serviço aos contratos de conservação afim de melhorar a qualidade da malha viária do Estado.



[DOI: 10.29327/1304307.48-1](https://doi.org/10.29327/1304307.48-1)

CONSERVA PRO: NOVAS ABORDAGENS DOS CONTRATOS DE MANUTENÇÃO DA MALHA RODVIÁRIA
DO DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS – DER/MG

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Manual de Conservação Rodoviária – DNIT, Publicação IPR –710

RODRIGUES, Régis Martins. Engenharia de Pavimentos – Parte 2 - Gerência de Pavimentos. Editora Ibep, 2020

Termo de Referência do Conserva Pro - Edital n° 90 de 2023 (Concorrência Pública) e Edital n° 134 de 2023 (RDC) constantes no site www.der.mg.gov.br.



MELHORIAS SUPERFICIAIS EM ESTRADAS DE TERRA

Thayse Balarotti Pedrazzi¹; Cassio Eduardo Lima de Paiva¹; Amaro Gabriel Joaquim¹

RESUMO

Este artigo apresenta a melhoria no acabamento da camada superficial de estrada de terra, com solos finos laterítico e não laterítico, através da superfície do leito existente tratado com adequados teores de cimento ou cal e acrescida da cravação de partículas granulares (com dimensões inferiores a 9,5 mm), antes da compactação final de acabamento e da cura, para melhoria das condições de rolamento e aderência.

Através de extenso programa de ensaios de laboratório, foi obtido que com o emprego de 4% de cimento ou 8% de cal aos solos finos laterítico (LG') e não-laterítico (NG'), compactados nas energias AASHTO normal e intermediária, respectivamente, as misturas alcançaram, simultaneamente, $RCS \geq 1,2$ MPa, $ISC \geq 20\%$, expansão $\leq 1\%$ e $PMI = 0\%$ aos 7 dias de cura; atendendo às especificações brasileiras para revestimento primário granular de estradas não pavimentadas e de solo melhorado com cimento e, adicionalmente, tolerância igual a zero para a erosão à ação da água. Utilizar agregados grossos de fresado asfáltico (com dimensões entre 9,5 mm e 4,8 mm), como tratamento primário por agulhamento, permite uma irregularidade mínima na superfície e é solução promissora para ser aplicada como nova fonte de aproveitamento do fresado armazenado em pilhas, que pode ser obtido gratuitamente pelos municípios de pequenas cidades.

PALAVRAS-CHAVE: Estrada de terra; solo melhorado com cimento; solo-cal; fresado asfáltico

ABSTRACT

This paper presents the improvement in the final surface layer of a earth road, with lateritic and non-lateritic fine soils, through the surface of the soil improvement with appropriate cement or lime content plus at embedding of granular particles with dimensions less than 9.5 mm, prior to finishing compaction and before curing, to improve rolling and grip conditions.

Through an extensive program of laboratory tests, it was obtained that with the use of 4% cement or 8% lime on lateritic (LG') and non-laterite (NG') fine soils, using AASHTO compaction effort standard and intermediate (Brazilian criterion) respectively, the mixtures simultaneously achieved $USC \geq 1.2$ MPa, $CBR \geq 20\%$, expansion $\leq 1\%$ and Loss of mass by immersion in water = 0% at 7 days of cure; meeting Brazilian specifications for granular coating of unpaved roads and cement-improved soil and, additionally, zero tolerance for erosion due to water action. Using reclaimed asphalt pavement (with dimensions between 9.5 mm and 4.8 mm), allows for minimal irregularities on the surface and is a promising solution to be applied as a new source of use for asphalt millings stored in piles, which can be obtained free of charge by municipalities in small towns.

KEY WORDS: Earth road; cement-improved soil; lime soil; reclaimed asphalt pavement

¹ InfrA, FECFAU, Universidade Estadual de Campinas, thpedrazzi@gmail.com; cassio@unicamp.br



DOI: [10.29327/1430212.49-103](https://doi.org/10.29327/1430212.49-103)

MELHORIAS SUPERFICIAIS EM ESTRADAS DE TERRA

INTRODUÇÃO

As estradas não pavimentadas representam 79% da malha viária brasileira, com predominância absoluta de estradas de terra, principalmente de solos tropicais, e sem qualquer tipo de tratamento na superfície; e, sob jurisdição municipal (DNIT, 2024; CNT, 2024; CNT, 2022). Estas estradas desempenham, no Brasil, um papel preponderante como meio de ligação entre pequenas cidades e áreas rurais, dando mobilidade ao escoamento dos produtos agrícolas, bem como acesso aos serviços gerais, contribuindo, assim, para a melhoria da qualidade de vida e no desenvolvimento das comunidades que possuem este tipo de infraestrutura viária (PIMENTEL, 2007).

E, também, em alguns locais, permitem a ligação entre o cinturão verde e a área urbana anexa. No cinturão verde, que é uma área com plantações destinadas a alimentação humana e que circula ou fica nas zonas rurais dos centros urbanos, a maior parte das suas estradas destinam-se ao acesso a propriedades rurais formadas por áreas de lazer e áreas agrícolas produtoras de produtos hortifrúteis; daí a importância da sua trafegabilidade para acessibilidade e distribuição de insumos, e, não para tráfego contínuo ou pesado.

Apesar da importância econômica e social destas estradas às comunidades que fazem parte, as restrições econômicas e a precariedade técnica que enfrentam os municípios brasileiros fazem com que essa classe de rodovia não sofra um processo apurado de construção nem uma manutenção adequada (FERREIRA e PAIVA, 2007). Como consequência, a superfície estradal se deteriora rapidamente, reduzindo a mobilidade veicular, limitando o desenvolvimento social e econômico e pondo em risco o sucesso destas comunidades rurais; pois, sua situação torna-se crítica em épocas de chuva, quando a lama torna o tráfego precário e representa risco aos motoristas. Portanto, estas estradas não pavimentadas precisam ser trafegáveis durante todo o ano, exigindo um processo de perenização da sua superfície de rolamento.

A perenização da superfície de uma estrada pode ocorrer mediante duas grandes soluções: a primeira pelo tratamento do solo superficial de forma a torná-lo resistente ao tráfego e às chuvas, a segunda solução seria a construção de uma camada granular superposta ao subleito estradal compactado e que, igualmente, pudesse resistir às solicitações do tráfego e do clima.

O emprego de revestimento primário granular em vias não pavimentadas é uma solução normatizada pelos órgãos competentes no Brasil (DNIT, 2023b; DER-PR, 2023b; DER-SP, 2006; DER-BA, 2006); porém, a sua utilização ainda é pouco frequente, principalmente, devido ao custo de construção. Contudo, esta solução é frequentemente utilizada na América do Norte, Austrália e Europa com o sucesso esperado (JOAQUIM, 2017).

A estabilização química é um tratamento de baixo custo usado nos solos já desde tempos remotos. Adequados teores de aditivo químico, como cimento ou cal, podem ser aplicados para melhorar as propriedades físicas e mecânicas de solos com baixo desempenho, especialmente quando não se pretende atingir altas resistências e se deseja apenas tratar o solo local para atender a um baixo volume de tráfego e ao clima.

Neste contexto, este artigo apresenta um estudo de laboratório onde se buscou determinar a melhoria com cimento e cal de duas plataformas estradais em solo fino tropical, com baixo volume de tráfego e sem previsão de pavimentação em planos futuros imediatos (JOAQUIM, 2017); com acréscimo de cuidados construtivos para melhoria das condições de rolamento e aderência para promover a trafegabilidade em todos os momentos do ano, através da cravação de agregados



grossos de fresado asfáltico (*Reclaimed Asphalt Pavement* - RAP, em inglês) na superfície, como um tratamento primário por agulhamento (DER-PR, 2023b).

Merece destaque que resíduos das operações de fresagem de pavimentos asfálticos no Brasil não são reutilizados em novas capas recicladas e se constituem em passivo ambiental. Este artigo analisa a viabilidade técnica da utilização do resíduo da fresagem como tratamento primário.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os solos finos lateríticos usados na pavimentação são encontrados em grandes quantidades em países de clima tropical ao longo de todo o globo (ROBINSON e THAGESSEN, 2004), dentre eles o Brasil (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). Contudo, nem sempre na condição natural, estes solos apresentam um desempenho adequado como plataformas viárias de estradas não pavimentadas.

Para permitir uma superfície de rolamento com características superiores às do solo natural, com a função de assegurar condições satisfatórias de tráfego, mesmo sob condições climáticas adversas, o emprego de revestimentos primário em vias não pavimentadas é uma solução normatizada no Brasil (DNIT, 2023b; DER-PR, 2023b; DER-SP, 2006; DER-BA, 2006); porém, a sua aplicação ainda é limitada, razão pela qual as vias não pavimentadas apresentam-se muito precárias.

Segundo as especificações nacionais, na execução do revestimento primário granular é utilizado material de boa qualidade, selecionado e estabilizado granulometricamente, que é compactado em espessura entre 10 cm e 20 cm, sobre a terraplenagem concluída. Para efeito de seleção do material, os parâmetros são Índice de Suporte Califórnia – ISC (*California Bearing Ratio* - CBR, em inglês) e plasticidade, principalmente, na energia de compactação AASHTO intermediária.

Adequados teores de aditivo químico como cimento ou cal podem ser aplicados para melhorar as propriedades físicas e mecânicas de solos com baixo desempenho, especialmente quando se pretende tratar o solo local (KESTLER, 2009) e obter uma mistura que não deve ser rígida para ser mantida com a motoniveladora. Para empregar em revestimento primário de estradas não pavimentadas, esta técnica de estabilização já é usada na América do Norte, Austrália e Europa (AMARO, 2017).

No Brasil, vários trabalhos foram desenvolvidos com a aplicação de aditivos químicos, dentre eles cimento e/ou cal, de modo a melhorar o desempenho das camadas do pavimento (CONSOLI, MORAES e FESTUGATO, 2012; INGUNZA, PEREIRA e SANTOS JUNIOR, 2015; CONSOLI, LOPES e HEINECK, 2009; MARCON, CORRÊA e TRICHÊS, 2015); onde a seleção do teor do ligante é baseada, principalmente, na avaliação da resistência à compressão simples (RSC) e ISC, empregando energia de compactação AASHTO normal e intermediária.

Segundo Wahab *et al.* (2021), a adição de 6% de cimento ao solo fino laterítico (MH/A-7-5, segundo as classificações SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos e TRB/AASHTO - *Transportation Research Board*) foi considerado suficiente para obter um RCS superior a 0,8 MPa, considerando os padrões do Departamento de Obras Públicas da Malásia (Sudeste Asiático) para construção de estradas de baixo volume de tráfego. Os resultados do ensaio de durabilidade revelaram que a mistura solo-cimento resultante resistiu a 15 ciclos de umedecimento-secagem; no entanto, a RCS das amostras diminuiu em relação aos ciclos, mas no final do 15º ciclo, o resultado da RCS foi superior a 0,8 MPa. Esse trabalho mereceu destaque quanto aos requisitos e seus resultados pela sua semelhança com a pesquisa apresentada neste artigo técnico e por se tratar de país com clima com muita semelhança ao clima brasileiro.



DOI: [10.29327/1430212.49-103](https://doi.org/10.29327/1430212.49-103)

MELHORIAS SUPERFICIAIS EM ESTRADAS DE TERRA

Em outro trabalho feito pela mesma equipe de pesquisa da Malásia, Razali e Malek (2019), a camada tratada com cimento foi protegida por um tratamento superficial betuminoso.

Segundo Marcon, Corrêa e Trichês (2015), a adição de 2% e 3% de cal a solos expansivos (respectivamente CH/A-7-5 e CL/A-7-6, segundo as classificações SUCS/AASHTO), mudou o comportamento do solo, de não laterítico (NG') para laterítico (LG'), segundo a metodologia Miniatura Compactada Tropical – MCT, e gerou alterações de plasticidade e ISC nos solos, proporcionando viabilidade técnica para uso como subleito de pavimento de baixo volume de tráfego.

Segundo Lovato (2004), a adição de 3% de cal ao solo argilo-arenoso laterítico (LG', segundo a classificação MCT) apresentou comportamento aceitável para utilização em camada de base e/ou sub-base de pavimentos.

Não obstante, no que tange a revestimento primário de estradas não pavimentadas, é inexistente algum estudo que permita melhorar um solo superficial fino laterítico com adequados teores de aditivos químicos, que pudesse apresentar resistência ao tráfego e clima, e atender às especificações brasileiras para estradas deste porte.

A construção de uma estrada não pavimentada é mais economicamente viável quando não se precisa importar material. Neste sentido, quando se tem um solo tropical com propriedades geotécnicas aquém das requeridas nas normas para fins de pavimentação, a estabilização química pode ser uma solução interessante.

Deste modo, teores adequados de aditivo químico de cimento ou cal podem ser aplicados para melhorar as propriedades físicas e mecânicas destes solos, especialmente quando não se pretende atingir altas resistências, e se quer tratar o solo local para atender a um baixo volume de tráfego, tornando a solução economicamente viável. Este artigo objetiva avaliar o desempenho de dois solos finos tropicais, laterítico e não laterítico, no seu estado natural e após tratamento com adequados teores de cimento e cal. O assunto faz parte da linha de pesquisa em Infra e superestrutura rodoviária, em andamento, do programa de pós-graduação, na área de Transportes, do Departamento de Infraestrutura e Ambiente da Unicamp.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

O estudo foi desenvolvido fazendo-se o emprego de dois solos finos brasileiros, um laterítico e outro não laterítico, cada um deles tratados isoladamente com os dois aditivos químicos, nomeadamente, cimento (CP II-F-32, da CSN) e cal hidratada (CH-III ITAÚ, da Votorantim) (JOAQUIM, 2017).

Os dois solos estudados foram coletados na região de Campinas-SP e, considerando a profundidade de ocorrência do processo de laterização, os solos foram coletados na profundidade entre 2 e 5 metros. O primeiro solo (S-1) foi coletado no campus da Unicamp, nas imediações do Hospital das Clínicas, e o segundo solo (S-2) foi coletado em um trecho de estrada não pavimentada, ou estrada vicinal, que dá acesso à Rodovia Dom-Pedro, SP-065, pista norte, km 81+500.

Além dos dois solos selecionados serem bastante predominantes na região de Campinas, também se considerou o fato de serem solos com baixo desempenho, permitindo se avaliar o mínimo teor de aditivo para melhorá-los.

Como premissa, para determinar a dosagem adequada ou ótima de aditivo, isto é, a que permite a mistura atender aos requisitos das especificações construtivas para revestimento primário granular de estradas não pavimentadas (DNIT, 2023b; DER-PR, 2023b; DER-SP, 2006; DER-BA, 2006) e



para solo melhorado com cimento (DER-PR, 2023a), foram adotados valores limites para os ensaios ISC, expansão, RCS e, adicionalmente, tolerância nula para o ensaio de perda de massa por imersão em água – PMI, segundo a metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1995); parâmetros que devem ser atendidos simultaneamente, conforme apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Critérios de dosagem para as misturas

Parâmetros	RCS	ISC e expansão	PMI
Valores limites ^{NOTA}	$\geq 1,2$ MPa aos 7 dias de cura	$\geq 20\%$ e $\leq 1\%$	0%
Documento de origem	DER-PR (2023a)	DNIT (2023b); DER-PR (2023b); DER-SP (2006); DER-BA (2006)	Nogami e Villibor (1995)

NOTA: Valores característicos considerados nas misturas solos melhorados com cimento e com cal oriundos das especificações citadas e do livro técnico citado.

Em ordem de alcançar os objetivos, o programa de experimentos em laboratório foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa da pesquisa, os solos e as misturas compactados foram submetidos ao ensaio de RCS; além dos ensaios para caracterização e classificação dos solos sem aditivo (granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, mini-MCV e PMI). As variáveis independentes consideradas nesta etapa foram: teor de cimento (0%, 2,5%, 3%, 3,5% e 4%, em massa, em relação à massa do solo seco) (DER-PR, 2023a; DNIT, 2010), teor de cal (0%, 2%, 4%, 6% e 8%, em massa, em relação à massa do solo seco) (DNIT, 2019), energia de compactação (AASHTO normal e intermediária), de modo a definir os valores ótimos, para os teores dos aditivos e para as energias de compactação, que, simultaneamente, atendem ao critério de RCS $\geq 1,2$ MPa aos 7 dias de cura.

A segunda etapa da pesquisa consistiu na realização dos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, ISC, PMI, resistência à tração com compressão diametral (RTCD), cisalhamento direto (CD) e resistência à compressão triaxial estática (RCT) para as misturas ótimas dos solos com os aditivos, determinadas na primeira etapa; cumprindo-se, exceto nos ensaios de limites de consistência, o tempo de cura de 7 dias, devido ao tempo de reação dos aditivos com o solo. Portanto, nesta etapa, as misturas avaliadas para os solos S-1 e S-2 apenas consideraram os teores de 4% de cimento e de 8% de cal, compactadas usando a energia normal para S-1 e a energia intermediária para S-2.

Com base nos objetivos da pesquisa, também foram realizados os ensaios de limites de *Atterberg* (limite de liquidez e limite de plasticidade), para os solos na condição natural e após tratamento, permitindo avaliar a influência dos aditivos na plasticidade do solo.

Para os ensaios de RCS e RTCD foram moldados corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, e com 8 cm de diâmetro e 5 cm de altura, respectivamente.

Os ensaios de CD e RCT foram realizados usando as tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa, ambos ensaios na condição não drenada ou rápido (*Uncosolidated-Undrained* – UU, em inglês).

Os ensaios de laboratório seguiram as seguintes normas técnicas:

- Distribuição granulométrica das partículas – NBR 7181 (ABNT, 2016a);
- Determinação do limite de liquidez – NBR 6459 (ABNT, 2016b);
- Determinação do limite de plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 2016c);
- Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – NBR 9895 (ABNT, 2016d);
- Ensaio de resistência à compressão simples – NBR 12025 (ABNT, 2012);



DOI: 10.29327/1430212.49-103

MELHORIAS SUPERFICIAIS EM ESTRADAS DE TERRA

- Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão - DNIT-ME 258 (DNIT, 2023c);
- Resistência à tração por compressão diametral – DNIT-ME 136 (DNIT, 2018);
- Ensaio de cisalhamento direto - ASTM D6528 (ASTM, 2007);
- Ensaio triaxiais estático – ASTM D2850 (ASTM, 2015).

O programa experimental completo da pesquisa desenvolvida está representado esquematicamente na figura 1.

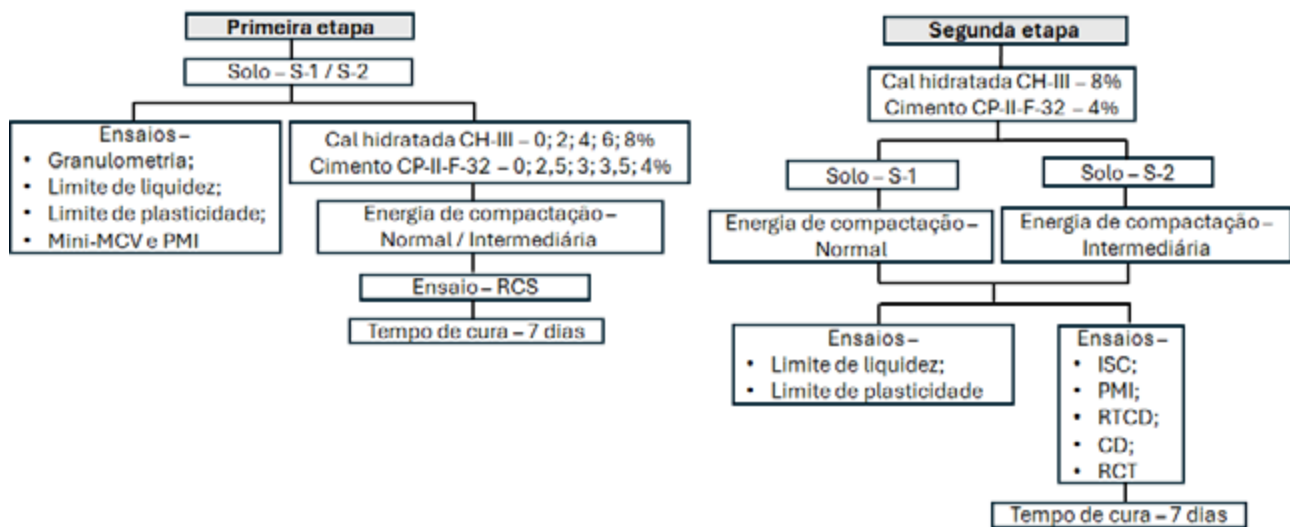


Figura 1. Programa experimental desenvolvido durante a pesquisa

RESULTADOS

A tabela 2 apresenta a classificação dos solos objetos de estudo, sem aditivo; obtida a partir dos ensaios de caracterização, Mini-MCV e PMI realizados na primeira etapa do programa de pesquisa.

Tabela 2. Classificação dos solos S-1 e S-2, sem aditivo

Solo	SUCS	AASHTO (IG) ^{Nota 1}	MCT ^{Nota 2}
S-1	ML	A-7-5 (10)	LG'
S-2	MH	A-7-5 (11)	NG'

NOTA 1: IG – Índice de Grupo; NOTA 2: DNIT, 2023a

A tabela 3 apresenta o resumo de todos os resultados dos ensaios realizados na segunda etapa do programa de pesquisa para as misturas ótimas dos solos com os aditivos, em comparação aos solos sem aditivo.

Conforme a tabela 3, os solos sem aditivo não atenderam aos requisitos mínimos considerados nesta pesquisa (tabela 1), o que justifica o estudo da sua melhoria com cimento e cal.

Destaca-se que, na energia de compactação normal, o solo laterítico S-1 (LG') apresentou desempenho maior que o outro solo não laterítico S-2 (NG') em todos os ensaios, tal como esperado. Portanto, para o S-2 (NG'), foi necessário um incremento da energia de compactação, isto é, da normal para intermediária.



Este estudo provou que, com a aplicação de 4% de cimento, que é considerado baixo teor, é possível melhorar os solos finos de comportamento laterítico S-1 (LG') e não-laterítico S-2 (NG') para uma aplicação como revestimento primário de estradas não pavimentadas.

Contudo, para a cal visando uma aplicação como revestimento primário de estradas não pavimentadas, foi requerida uma dosagem maior (8%) para melhorar os solos finos de comportamento laterítico S-1 (LG') e não-laterítico S-2 (NG'), o que pode ser justificado pela qualidade ou desempenho diferenciado dos aditivos entre si e a resposta dos solos e das suas misturas após o seu tratamento.

Tabela 3. Quadro resumo de resultados para os solos sem aditivo químico e para as misturas ótimas com aditivos químicos

SOLO	S-1 (LG')			S-2 (NG')		
Ter ótimo de aditivo	Solo sem aditivo	4% cimento	8% cal	Solo sem aditivo	4% cimento	8% cal
Limite de Liquidez (%)	47	45	44	52	56	47
Índice de plasticidade (%)	13	12	8	20	18	11
Teor de umidade ótima (%)	25,4	24,0	27,4	21,6	24,2	23,6
Massa específica seca máxima (g/cm ³)	1,63	1,67	1,57	1,69	1,77	1,57
ISC (%)	18	56	79	20	58	63
Expansão (%)	0,16	0,03	0	0,71	0,03	0
RCS (MPa)	0	1,60	1,28	0	1,70	1,44
PMI (%)	38	0	0	1	0	0
RTCD (MPa)	0,02	0,13	0,08	0,04	0,14	0,13
Ângulo atrito - CD (°)	31	60	39	35	61	40
Coesão - CD (kPa)	79	190	245	112	148	231
Ângulo atrito - RCT (°)	33	42	34	34	42	35
Coesão - RCT (kPa)	70	126	167	172	188	261
Energia de compactação AASHTO	Normal			Intermediária		

De forma a avaliar o desempenho das melhores misturas compactadas no campo, como solo melhorado com cimento e solo-cal, foram confeccionados 6 corpos de prova para ficarem expostos ao clima, como apresentados na figura 2. Para cada um dos solos pesquisados, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, sendo: 01 na condição natural (sem aditivo), 01 com 4% de cimento e 01 com 8% de cal; moldados nos valores ótimos de teores dos aditivos e energia de compactação definidos na pesquisa em laboratório (tabela 3).

Na figura 2 (a) e (b), pode-se visualizar os 3 corpos de prova moldados com cada um dos solos pesquisados, sendo que, dentre os 2 corpos de prova adjacentes, o primeiro foi moldado com 4% de cimento e o segundo com 8% de cal, e o corpo de prova atrás dos dois adjacentes foi moldado na condição natural (sem aditivo).

Conforme a figura 2, os corpos de prova moldados com o S-1 (LG') (figura 2(a)) apresentaram pequenas fissuras após o período de 2 meses de exposição; sendo que, a trinca foi notória, sobretudo, no corpo de prova sem aditivo. Já os corpos de prova moldados com S-2 (NG') (figura 2(b)), no geral, não apresentaram fissuras.

Verificou-se, também, que o S-1 (LG') (figura 2(a)) com aditivos, apresentou a superfície mais regular ou lisa em comparação com o S-2 (NG') (figura 2(b)) com aditivos, pois o S-1 (LG') possui maior quantidade de finos (70%), principalmente, de argila, que é responsável por gerar maior integração ou coesão entre as partículas.



DOI: 10.29327/1430212.49-103

MELHORIAS SUPERFICIAIS EM ESTRADAS DE TERRA

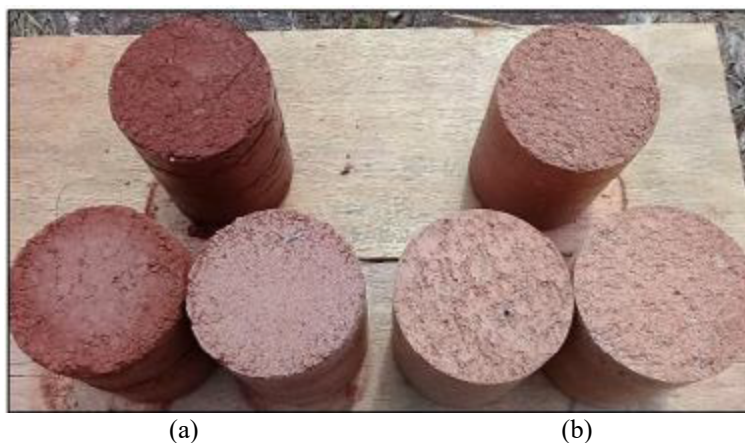


Figura 2. Corpos de prova expostos ao clima: (a) com S-1 (LG²), dentre os 2 adjacentes à frente, o primeiro foi moldado com 4% de cimento e o segundo com 8% de cal, compactados na energia normal; (b) com S-2 (NG²), dentre os 2 adjacentes à frente, o primeiro foi moldado com 4% de cimento e o segundo com 8% de cal, compactados na energia intermediária - após 2 meses de exposição (Acervo do terceiro autor)

Portanto, os requisitos para materiais granulares apresentados nas especificações brasileiras para revestimento primário e solos melhorados quimicamente, acrescido da tolerância nula à erosão pela ação da água, tomados como premissa da pesquisa (tabela 1), podem ser obtidos não somente para o cimento, mas também para a cal.

A principal desvantagem desta solução é que a superfície final resultante é muito lisa. Outra desvantagem desta solução seria a infiltração de água em trincas, semelhantes às fissuras ocorridas nos corpos de prova da figura 2, que poderia promover deterioração precoce da camada.

Merece destaque a ausência de especificação de serviço construtivo de camada de solo tratado exposta ao tráfego e ao clima no Brasil. As especificações existentes para solo estabilizado ou melhorado com cimento ou com cal se destinam a camadas tratadas de regularização de subleito, sub-base e base que são camadas intermediárias de pavimento e devidamente protegidas por revestimento superposto e, portanto, não ficam expostas ao clima e ao tráfego durante a sua vida útil.

O processo de estabilização química de solos é um processo que precisa ser cuidadoso porque diferentes tipos de solos exigem diferentes teores dos aditivos melhoradores; naturalmente, para cada tipo de solo é necessário um estudo de laboratório específico. Esta solução exige um processo construtivo também cuidadoso, no qual, o aditivo em pó precisa ser igualmente distribuído no solo solto, devidamente misturado e adequadamente umedecido, para que os resultados de laboratório possam ser reproduzidos no campo. Esta construção necessita de equipamentos de construção pesada para se obter o sucesso esperado (DER-PR, 2023a).

Retornando ao aspecto peculiar da solução de tratamento do solo superficial por via química ficar lisa e poder gerar falta de segurança veicular, este inconveniente poderia ser sanado com a cravação de fragmentos granulares sobre a superfície estradal antes da sua compactação final e antes da cura. Nesta pesquisa foi utilizada uma fina camada granular, na ordem de 2 cm, de resíduos de fresagem, cravada, permitindo uma irregularidade mínima nesta superfície. Preferencialmente, o serviço deve ser executado com a cravação de partículas granulares com tamanho inferior a 9,5mm (entre 9,5mm a 4,8mm), prévia a compactação final de acabamento e antes da cura, com rolo liso; como um tratamento superficial por agulhamento (DER-PR, 2023b).



A utilização de resíduos de fresagem no agulhamento visou uma solução sustentável para materiais granulares pouco utilizados como reuso no Brasil, além de se constituir de partículas resistentes à chuva. Esta utilização é semelhante àquela sugerida por Trombeta (2023) e Silva (2023), que analisaram a utilização de fragmentos de resíduos cerâmicos como material de agulhamento sobre plataformas estradais.

A figura 3 mostra um corpo de prova (cilíndrico, com 10 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura) onde o processo de agulhamento proposto, utilizando agregados grossos de fresado asfáltico (com dimensões entre 9,5 mm e 4,8 mm), foi executado sobre a superfície do solo laterítico S-1 (LG') melhorado com 4% de cimento, compactado na energia normal.

O material fresado utilizado na pesquisa foi obtido da fresagem do pavimento asfáltico da avenida John Boyd Dunlop, na cidade de Campinas-SP, e cedido pela Prefeitura Municipal de Campinas - PMC.

Os agregados graúdos do fresado foram obtidos por peneiramento, conforme norma NBR 7181 (ABNT, 2016a), utilizando-se as peneiras 1/2" (12,7 mm), 3/8" (9,5 mm) e #4 (4,8 mm). As frações retidas na peneira de 12,7 mm foram descartadas, e a composição adotada foi de 25% (material retido na peneira de 9,5 mm) e 75% (material retido na peneira de 4,8 mm), utilizada sem processamento adicional e conforme o material recebido da PMC.



Figura 3. Corpo de prova da mistura S-1 (LG') melhorada com 4% de cimento, compactado na energia normal, com tratamento primário por agulhamento na superfície, utilizando agregados grossos de fresado asfáltico (Acervo do primeiro autor)

Comparativamente a esta solução proposta, poder-se-ia prever um tratamento superficial betuminoso semelhante ao apresentado por Wahab *et al.* (2021), que relatou sucesso após 18 meses de acompanhamento da solução da camada de solo tratada mais tratamento superficial betuminoso.

CONCLUSÃO

Este trabalho objetiva apresentar o desempenho de dois solos finos tropicais, um laterítico S-1 (LG') e outro não laterítico S-2 (NG'), no seu estado natural e após tratamento com teores



DOI: [10.29327/1430212.49-103](https://doi.org/10.29327/1430212.49-103)

MELHORIAS SUPERFICIAIS EM ESTRADAS DE TERRA

adequados de cimento ou cal, para empregar como revestimento primário de estradas não pavimentadas.

Conclui-se que o emprego de 4% de cimento ou 8% de cal aos solos S-1 (LG') e S-2 (NG'), compactados nas energias AASHTO normal e intermediária, respectivamente, atenderam, simultaneamente, as especificações brasileiras para revestimento primário granular de estradas não pavimentadas ($CBR \geq 20\%$ e $expansão \leq 1\%$), para solo melhorado com cimento ($RCS \geq 1,2$ MPa) e, adicionalmente, a tolerância igual a zero para a erosão à ação da água ($PMI = 0\%$), aos 7 dias de cura.

O tratamento dos solos com teores adequados de cimento ou cal mais a cravação de fina camada de partículas granulares de fresado asfáltico (com dimensões entre 9,5 mm e 4,8 mm), prévia a compactação final de acabamento da superfície e a cura, como tratamento primário por agulhamento, é apresentado como solução alternativa, sustentável e econômica para o acabamento de estradas de terra.

O teor ótimo de cimento obtido nesta pesquisa apresentou valor inferior àqueles necessários a uma mistura tipo solo-cimento, e adequado ao valor mínimo de RCS para uma camada melhorada com cimento. O solo S-1 (LG') alcançou os valores mínimos de RCS, ISC e PMI considerados, com compactação na energia normal; enquanto, o solo S-2 (NG') apenas os atingiu na energia intermediária, como está prescrita na especificação de serviço de pavimentação ES-PA-11 do DER-PR (2023a) para solo tratado com cimento.

O teor ótimo de cal obtido nesta pesquisa apresentou valor superior àqueles necessários a uma mistura para melhoria com cal do subleito, como está prescrita na especificação de serviço ES-422 do DNIT (2019). Assim como nas misturas com cimento, as resistências mínimas consideradas no estudo das misturas de solo com cal, o solo S-1 (LG') necessitou de uma energia de compactação normal, enquanto o solo S-2 (NG') precisou ser compactado na energia intermediária.

Neste processo construtivo, o solo tratado é aquele da plataforma estradal e os únicos materiais importados são os aditivos químicos para a sua melhoria. Devido a este fato, constitui-se numa técnica construtiva de baixo custo, mas que, por outro lado, a exigência de estudo laboratorial prévio para determinar o teor mínimo necessário de atendimento dos requisitos técnicos exigidos causa muito receio nos gestores rodoviários e desestimula a consideração deste processo construtivo. A não realização de estudo laboratorial prévio, ou estudo deficiente, resulta em teor de aditivo inferior ao adequado, que promove precoce deterioração da camada, ou em teor superior, que, além de ser antieconômico, pode promover elevada rigidez da camada, que poderá ser trincada durante a construção ou na sua fase de operação, por fadiga prévia da sua vida útil de projeto.

Muitas pesquisas têm sido dedicadas ao reaproveitamento de agregados da fresagem de pavimentos asfálticos; o desenvolvimento de soluções interessantes é exigência para o desenvolvimento sustentável.

Naturalmente, processos de melhoramento por via química de solos superficiais resultam em solução de menor custo e menor impacto ambiental que a solução convencional de revestimento primário granular superposto que utiliza, predominantemente, agregados de origem pétreo obtidos diretamente da pedreira.

Outras soluções alternativas já foram analisadas no Brasil visando a eliminação, ou diminuição, dos agregados pétreos virgens mediante a sua substituição por resíduos graúdos da construção civil, que, predominantemente, têm sido estudados como agregados de misturas de concreto ou camadas de sub-base para pavimentos (MARTINS *et al.* 2021; ANGULO, 2023; ARULRAJAH *et al.*, 2012).



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D6528 - Standard test method for consolidated undrained direct simple shear testing of cohesive soils, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D2850 - Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils, 2015.
- ANGULO, S. C. Resíduos de construção e demolição: fundamentos sobre gestão e reciclagem. São Paulo: EPUSP, 2023.
- ARULRAJAH, A. et al. Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications. *Geotechnical Testing Journal*, v. 35, n. 5, p. 743-751, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT:NBR 7181 - Solo - Análise granulométrica, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT:NBR 6459 - Solo - Determinação do limite de liquidez, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT:NBR 7180 - Solo - Determinação do limite de plasticidade, 2016c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT:NBR 9895 - Solo - Índice de Suporte Califórnia, 2016d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT:NBR 12025 - Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos, 2012.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Boletins técnicos CNT - abril de 2024.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Anuário CNT do transporte - estatísticas consolidadas, 2022.
- CONSOLI, N. C.; LOPES JR, L. S.; HEINECK, K. S. Key parameters for the strength control of lime stabilized soils. *Journal of materials in Civil Engineering*, v. 21, n. 5, p. 210-216, 2009.
- CONSOLI, N. C.; MORAES, R. R.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of fiber-reinforced cemented soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. 10, p. 1568-1573, 2012.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DER-PR-ES-PA 11 - Pavimentação: solo-cimento e solo tratado com cimento, 2023a.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DER-PR-ES-TE 07 - Terraplenagem: revestimento primário, 2023b.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DER-SP-ET-DE-P00/013 - Revestimento primário, 2006.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DER-BA-ES-T-08/01 - Revestimento primário, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-CLA-259 - Solos - Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura, 2023a.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ES-140 - Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ES-422 - Pavimentação – Solo-cal – Adição de cal para melhoria de subleito, 2019.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ES-445 - Terraplenagem – Revestimento primário, 2023b.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT - Guia SNV, 2024.



[DOI: 10.29327/1430212.49-103](https://doi.org/10.29327/1430212.49-103)

MELHORIAS SUPERFICIAIS EM ESTRADAS DE TERRA

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME-136 - Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME-258 - Solos - Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão, 2023c.

FERREIRA, F. M.; PAIVA, C. E. L. Uma aplicação comparativa de métodos de avaliação das condições superficiais de estrada não-pavimentada. Revista Vias Gerais, n. 6, p. 20-24. ASSENDER - Associação de Engenheiros do DER/MG, 2007.

INGUNZA, M. P. D.; PEREIRA, K. L. A.; SANTOS JUNIOR, O. F. Use of sludge ash as a stabilizing additive in soil-cement mixtures for use in road pavements. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 27, n. 7, 06014027, 2015.

JOAQUIM, A. G. Estudo de dois solos tropicais melhorados com cimento ou cal para emprego em camadas superiores de estradas não pavimentadas. Dissertação de mestrado. Campinas: Unicamp, 2017.

KESTLER, M. A. Stabilization selection guide for aggregate and native-surfaced low-volume roads. Washington: National Technology and Development Program, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 2009.

LOVATO, R. S. Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação. Dissertação de mestrado. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

MARCON, A. F.; CORRÊA, J. F.; TRICHÊS, G. Improvement in physical and mechanical properties of soils by the addition of lime for paving roads. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2473, p. 209-214, 2015.

MARTINS, L. et al. Influência de agregados reciclados de concreto nas propriedades de novos concretos. Research, Society and Development, v. 10, n. 4, e34210414238, 2021.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Vilibor, 1995.

PIMENTEL, K. C. A. Estradas não-pavimentadas e ferrovias reforçadas com geossintéticos. Tese de doutorado. Brasília: UNB, 2007.

RAZALI, R.; MALEK, M. S. C. The usage of cement for soil stabilisation in construction of low volume roads in Malaysia. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 512 012006, 2019.

ROBINSON, R., THAGESEN, B. Road engineering for development. London: Taylor & Francis, 2004.

SILVA, T. C. A. Análise do método do agulhamento no ensaio CBR sem imersão. Trabalho de conclusão de curso. Ilha Solteira: UNESP, 2023.

TROMBETA, E. R. Adaptação do ensaio CBR para o método do agulhamento com o uso de resíduos cerâmicos. Trabalho de conclusão de curso. Ilha Solteira: UNESP, 2023.

WAHAB, N. A. et al. Strength and durability of cement-treated lateritic soil. Sustainability, 13(11), 6430, 2021.



INFLUÊNCIA DAS CHUVAS NA IMPRODUTIVIDADE DE OBRAS DE TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO NA CIDADE DE ARACAJU/SE

Flavia Santos Cardoso¹ & Zacarias Caetano Vieira¹

RESUMO

As chuvas causam impactos significativos na execução de obras, especialmente terraplenagem e pavimentação. Cronogramas que não consideram esses impactos levam ao não cumprimento do prazo, aumento dos custos e redução da qualidade das obras. Diante do exposto, este artigo objetiva determinar a improdutividade em obras de pavimentação e terraplenagem na cidade de Aracaju/SE em virtude das chuvas. Inicialmente foram obtidos dados de precipitação de chuvas em Aracaju/SE. Em seguida, realizou-se o tratamento dos dados para gerar o fator de improdutividade de cada mês. Posteriormente, foram determinados os dias úteis totais de cada mês e aplicando o fator de produtividade calculado, foram estimados os dias úteis trabalháveis e improdutivos. Os resultados mostraram que o período de Abril a Julho não é apropriado para se executar obras de grande afetação pelas chuvas, visto que, há muitos dias improdutivos por decorrência dos eventos de precipitação. Conclui-se que: a) O regime pluviométrico de Aracaju/SE afeta consideravelmente a produtividade de obras de pavimentação e terraplenagem; b) É indispensável conhecer os impactos gerados pelas chuvas, para que se possa realizar um planejamento adequado; c) As improdutividades decorrentes das chuvas devem ser consideradas ainda na fase de planejamento, visando assim, atenuar seu impacto no cronograma físico-financeiro da obra.

PALAVRAS-CHAVE: Improdutividade; Águas pluviais; Pavimentação; Terraplenagem.

ABSTRACT

Rains cause significant impacts on the execution of works, especially earthmoving and paving. Schedules that do not consider these impacts lead to non-compliance with deadlines, increased costs and reduced quality of works. Given the above, this article aims to determine the unproductivity of paving and earthmoving works in the city of Aracaju/SE due to rain. Initially, rainfall data was obtained in Aracaju/SE. The data was then processed to generate the unproductivity factor for each month. Subsequently, the total working days of each month were determined and applying the calculated productivity factor, the workable and unproductive working days were estimated. The results showed that the period from April to July is not suitable for carrying out works that are highly affected by rain, as there are many unproductive days due to precipitation events. In conclusion: a) The pluviometric regime in Aracaju/SE considerably affects the productivity of paving and earthmoving works; b) It is essential to know the impacts generated by rain, so that adequate planning can be carried out; c) Unproductive activities resulting from rain must be considered during the planning phase, thus aiming to mitigate their impact on the physical-financial schedule of the work.

KEY WORDS: Unproductivity; Rainwater; Paving; Earthworks.

¹ Instituto Federal de Sergipe, Curso de Engenharia Civil, fcardoso0063@gmail.com; zacariascaetano@yahoo.com.br



DOI: [10.29327/1430212.49-108](https://doi.org/10.29327/1430212.49-108)

INFLUÊNCIA DAS CHUVAS NA IMPRODUTIVIDADE DE OBRAS DE
TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO NA CIDADE DE ARACAJU/SE

INTRODUÇÃO

Diante do cenário atual da construção civil, de alta competitividade e maior grau de exigência dos clientes, é imprescindível realizar ações voltadas para a fase de planejamento e controle das obras, buscando-se elaborar um cronograma, e posteriormente, realizar a análise de praticabilidade das atividades. A Câmara Brasileira da Indústria e da Construção, define a praticabilidade como uma relação entre a quantidade de horas produtivas disponíveis após deduções decorrentes do estudo da obra (CBIC, 2021). Conforme relata Barreto et al. (2023), essa praticabilidade pode ser analisada em períodos chuvosos, já que a chuva inviabiliza a produção de frentes de serviços, impactando no cronograma da obra e assim, gerando maiores deduções horárias em cima das horas disponíveis da jornada de trabalho.

Geralmente, quando se calcula o tempo necessário para execução das atividades não se considera a incidência de fatores improdutivos e deduções horárias. Dentre esses fatores, têm-se as chuvas, que causam improdutividade que incidem no prazo real das atividades como um percentual multiplicador, que depende da época do ano, da intensidade das chuvas e do tipo de serviço a ser executado (BARRETO *et al.*, 2023). Segundo Mattos (2016), a depender da intensidade das chuvas, elas podem não afetar em nada ou afetar todo o dia de trabalho, e em casos com maior precipitação, pode-se afetar o dia posterior e até mesmo dois dias após cessar as chuvas, sendo essa condição denominada fator de retomada, que é o tempo que o material leva para restabelecer sua umidade em um grau que possa ser trabalhado.

A elaboração de um cronograma deve levar em conta todos os aspectos que podem influenciar a programação da obra, de modo a evitar problemas como falta de material, imprevistos climáticos e baixo efetivo de funcionários (FORMENTINI, 2017). Dentro desse contexto, Farias (2022) indica que para a realização do cronograma é de suma importância correlacionar o período de chuva da região com cada etapa da obra, evitando assim a paralisação parcial, ou total, das atividades nos períodos de execução de serviços. Em algumas localidades do nosso país, em razão de um regime hidrológico bem definido, em determinados períodos a realização dos serviços de obras rodoviárias se torna impraticável, sendo as atividades de execução dessas obras, normalmente paralisadas ou sensivelmente reduzidas, podendo essas paralisações serem previstas e gerarem um impacto em alguns custos da obra (ROCHA, 2018).

Construções de estradas, serviços de terraplenagem e pontes, são altamente sensíveis às chuvas, o que não só provoca uma redução direta na produtividade da atividade, mas também causa um impacto indireto durante e após a cessação das chuvas (PAN, 2005). Segundo esse mesmo autor, o impacto indireto é atribuído à incapacidade dos colaboradores da construção a trabalhar, à dificuldade de operar máquinas e à incapacidade de utilizar material de construção devido à grande quantidade de água absorvida. Chuvas fortes muitas vezes levam à suspensão completa da construção de rodovias devido às condições impraticáveis de solo saturado (EL-RAYES, K.; MOSELHI, 2001).

Borges Júnior e Barros (2020) analisaram os atrasos em obras de pavimentação asfáltica, apontando as causas de desvios de prazo mais frequentes de acordo com uma revisão da literatura internacional e três estudos de caso no estado de São Paulo. Segundo esses autores, o primeiro colocado na causa de atrasos das obras de pavimentação estudadas foi o item tempo/condições



meteorológicas. Ou seja, a chuva foi o fator de grande impacto para desvios de prazo nessas obras. Além do mais, vale ressaltar que não é permitida a execução das atividades em dias de chuva (DER/SP, 2005 *apud* BORGES JÚNIOR, BARROS, 2020).

Os atrasos causados pela chuva podem revelar-se dispendiosos para os executores das obras e afetar significativamente a rentabilidade a longo prazo se não forem cuidadosamente considerados durante as fases de planejamento (FORD; PATTERSON; SIMS, 2009).

As chuvas são consideradas um importante fator de incerteza que tem impactos adversos na produtividade e na duração das atividades de construção de rodovias. Na prática, dada a localização, tipo, data de início e duração original das atividades, uma abordagem comum para os planejadores avaliarem o efeito da chuva é adicionar uma certa porcentagem de tempo às tarefas. No entanto, este método depende principalmente da experiência e do julgamento subjetivo desses planejadores, que podem não estar familiarizados com o padrão de precipitação e o seu impacto na produtividade das operações e, portanto, muitas vezes produz resultados imprecisos (PAN; HADIPRIONO; WHITLATCH, 2005. p157).

Quantificar o impacto das chuvas na produtividade da construção de rodovias é essencial na preparação de cronogramas realistas e estimativas de custos (EL-RAYES, K.; MOSELHI, 2001). Nesse sentido, o novo sistema de custos do DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte prevê a utilização de um fator que considera a influência da pluviometria e de outras condições climáticas desfavoráveis sobre a eficiência dos equipamentos e a produção das equipes mecânicas e de mão de obra, a ser aplicado diretamente sobre o custo unitário de execução de alguns serviços, chamado de Fator de Influência de Chuvas (DNIT, 2017). De acordo com Rocha (2018) o fator de influência de chuvas é utilizado apenas para correção das produções estimadas dos serviços,



[DOI: 10.29327/1430212.49-108](https://doi.org/10.29327/1430212.49-108)

INFLUÊNCIA DAS CHUVAS NA IMPRODUTIVIDADE DE OBRAS DE TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO NA CIDADE DE ARACAJU/SE

em função do tratamento da série histórica das estações pluviométricas, não tendo por objetivo definir o cronograma.

OBJETIVOS

Realizar uma análise dos dados pluviométricos diários na cidade de Aracaju entre o período de março/1951 e junho/2019, e determinar a improdutividade em obras de pavimentação e terraplenagem decorrente do regime pluviométrico local.

METODOLOGIA

Área de estudo

Foi adotada a cidade de Aracaju que é, conforme relatam Duarte, Santos e Castelhana (2021), uma cidade litorânea e a maior unidade municipal urbanizada do estado de Sergipe, de clima tropical úmido e chuvas expressivas entre março e julho/agosto.

Metodologia

Inicialmente foram captados os dados diários de precipitação de Aracaju/SE no período de março/1951 e junho/2019. Em seguida, foram determinados, no período analisado, o total de dias de cada mês, e depois, o total de dias improdutivos no mesmo período, de acordo com os critérios de corte descritos adiante. A relação entre o total de dias improdutivos e o total de dias no período, gera para cada mês o fator de improdutividade. Por fim, foram estimados os dias úteis trabalháveis de cada mês para o ano de 2024, deduzindo sábados, domingos e feriados (nacionais, estaduais e municipais que não caíram em finais de semana), e aplicando do fator de improdutividade.

Dados de precipitação

Foram utilizados os dados pluviométricos diários da cidade de Aracaju do período de março/1951 a junho/2019. Os dados utilizados são de domínio público e são oriundos da estação pluviométrica N°



1037004 da Agência Nacional das Águas (ANA), disponível em seu site HIDROWEB. Através desses dados, foi gerado um gráfico de precipitação média (Figura 1), apresentado abaixo.

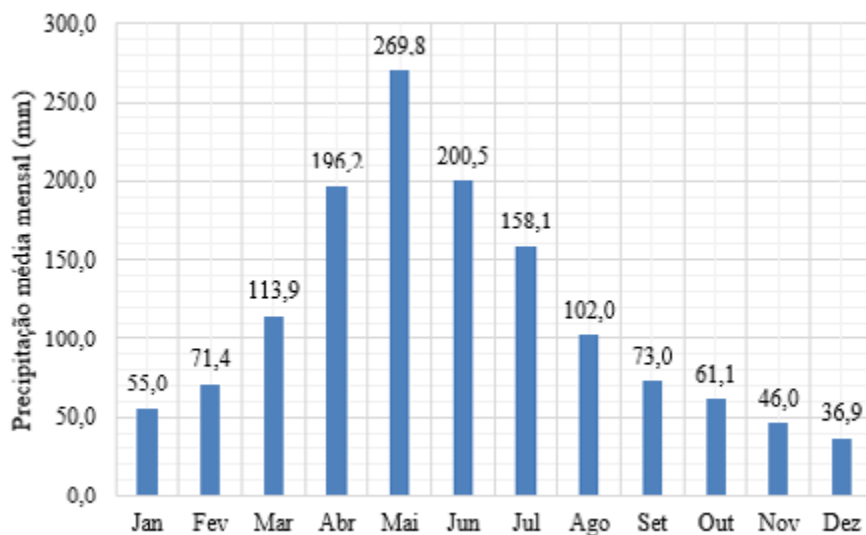


Figura 1. Precipitação média mensal (mm) de Aracaju no período de 03/1951 a 07/2019.
Fonte: Elaborado pelos autores

Critérios de Corte de Dias Úteis com Base nas Chuvas

Foram deduzidos sábados, domingos e feriados (nacionais, estaduais e do município de Aracaju que não caíram em finais de semana), por fim, para concluir o estudo de praticabilidade das atividades, determinou-se quais dias do mês não são produtivos por ocorrências de chuvas, vinculados ao tipo de serviço a ser executado. Para determinação dos dias de chuva impraticáveis para serviços de grande

DOI: [10.29327/1430212.49-108](https://doi.org/10.29327/1430212.49-108)

INFLUÊNCIA DAS CHUVAS NA IMPRODUTIVIDADE DE OBRAS DE TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO NA CIDADE DE ARACAJU/SE

afetação pelas chuvas, como por exemplo, terraplenagem e pavimentação, foi adotado o critério de Mattos (2016) adaptado por Barreto et al. (2023):

- I. Precipitação < 5 mm – Desprezar (o dia não é afetado, a obra produz normalmente);
- II. 5 mm < Precipitação < 10 mm – O dia não é praticável;
- III. Precipitação > 10 mm – O dia da chuva e o dia seguinte não são praticáveis

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dias úteis do ano de 2024

Os dados da Tabela 1 apresentam a quantidade de dias úteis como base o ano de 2024, adotando como premissa que sábados, domingos e feriados não são trabalháveis.

Tabela 1. Dias úteis do ano de 2024.

<i>Descrição</i>	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
<i>Dias do mês</i>	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
<i>Sábados</i>	4	4	5	4	4	5	4	5	4	4	5	4
<i>Domingos</i>	4	4	5	4	4	5	4	4	5	4	4	5
<i>Feriados</i>	1	1	1	1	2	1	1	0	0	1	2	1
<i>Dias úteis</i>	22	20	20	21	21	19	22	22	21	22	19	21

Fonte: Elaborado pelos autores

Improdutividades de cada mês

Com os dados pluviométricos, calculou-se para cada mês, o número total de dias no período histórico e o número de dias chuvosos cuja altura pluviométrica impacta no dia de serviço, ou seja, acima de 5 mm. Para os eventos chuvosos acima de 10 mm, contabilizou-se também o dia seguinte. Os dados foram compilados, resultando no percentual improdutivo (razão entre o número de dias que se



enquadram no critério pelo número de dias totais no período) para cada mês correspondente, conforme apresentado na Tabela 2, abaixo.

Tabela 2. Cálculo de Improdutividade para cada mês

<i>Mês</i>	<i>Nº dias do mês</i>	<i>Recorrência dos meses</i>	<i>Nº dias totais no período</i>	<i>Dias de chuva entre 5 e 10mm</i>	<i>Dias de chuva superiores a 10 mm</i>	<i>Percentuais de dias improdutivos</i>
<i>Jan</i>	31	51	1582	61	134	12,33%
<i>Fev</i>	28	51	1440	72	188	18,05%
<i>Mar</i>	31	52	1612	104	350	28,16%
<i>Abr</i>	30	51	1530	137	516	42,87%
<i>Mai</i>	31	51	1582	144	724	54,87%
<i>Jun</i>	30	51	1530	186	616	52,42%
<i>Jul</i>	31	49	1519	204	444	42,66%
<i>Ago</i>	31	50	1550	163	271	28,19%
<i>Set</i>	30	49	1470	92	194	19,46
<i>Out</i>	31	50	1550	51	146	12,71%
<i>Nov</i>	30	49	1470	44	118	11,02%
<i>Dez</i>	31	50	1150	30	88	10,26%

Fonte: Elaborado pelos autores

Dias úteis trabalháveis e dias úteis improdutivos

Para indicação dos dias improdutivos foram aplicados os percentuais de dias improdutivos (Tabela 2) no total de dias úteis de cada mês (Tabela 1). Os dias úteis trabalháveis são determinados subtraindo dos dias úteis de cada mês os dias improdutivos. Determinou-se a jornada de trabalho, considerando as seguintes premissas: execução das atividades de segunda a sexta-feira, das 07h às 17h, com intervalo de 01h para refeição, totalizando assim, jornada diária de 9h. Com a jornada de trabalho



DOI: 10.29327/1430212.49-108

INFLUÊNCIA DAS CHUVAS NA IMPRODUTIVIDADE DE OBRAS DE
TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO NA CIDADE DE ARACAJU/SE

definida, foram obtidas as horas totais disponíveis para trabalho de cada mês. Os resultados são apresentados na Tabela 3, abaixo.

Tabela 3. Aplicação da improdutividade para expor os dias úteis trabalháveis, dias úteis improdutivos e horas disponíveis.

	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
<i>Dias úteis totais disponíveis</i>	22	20	20	21	21	19	22	22	21	22	19	21
<i>Horas totais disponíveis</i>	198	180	180	189	189	171	198	198	189	198	171	189
<i>Improdutividade</i>	12%	18%	28%	43%	55%	52%	43%	28%	19%	12%	11%	10%
<i>Dias úteis trabalháveis</i>	19	16	14	12	9	9	13	16	17	19	17	19
<i>Dias úteis improdutivos</i>	3	4	6	9	12	10	9	6	4	3	2	2
<i>Horas disponíveis</i>	171	144	123	108	81	81	117	144	153	141	153	171

Fonte: Elaborado pelos autores

Os resultados apresentados nas Tabelas 2 e 3, indicam que o período de abril a julho não é apropriado para se executar obras de grande afetação pelas chuvas na cidade de Aracaju, visto que há muitos dias improdutivos por decorrência dos eventos de precipitação. Sendo assim, é recomendado que esses serviços sejam deslocados, sempre que possível, para o período seco, principalmente nos meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro, para que não ocorram grandes perdas e atrasos na execução destes. Conforme relata Barreto *et al.* (2023), não sendo possível o deslocamento das



atividades para o período de menor índice de chuvas, deve-se considerar as improdutividades encontradas, de modo a contingenciar os sobrecustos decorrentes das chuvas.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- a) O regime pluviométrico de Aracaju/SE afeta consideravelmente a produtividade de obras de pavimentação e terraplenagem, especialmente no período de abril a julho;
- b) É indispensável conhecer os impactos gerados pelas chuvas, para que se possa realizar um planejamento adequado, visando minimizar os riscos e garantir a eficiência;
- c) As improdutividades decorrentes das chuvas devem ser consideradas ainda na fase de planejamento, visando assim, atenuar seu impacto no cronograma físico-financeiro da obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRETO, G. B. et al. Impacto das chuvas dentro de um contexto histórico em obras na Região de Belo Horizonte – MG. 2023. 32 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Belo Horizonte, Belo Horizonte, 2023.

BORGES JÚNIOR, W. M.; BARROS, J. M. de C. Causas de atrasos em obras de pavimentação asfáltica no estado de São Paulo. In: 34º CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 38., 2020, Anais [...] Evento Online: ANPET, 2020.

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Caminhos para viabilizar a continuidade dos contratos impactados pela pandemia. 2021. Disponível em: https://cbic.org.br/obras-industriais/es_ES/publicacoes/. Acesso em 28 de maio de 2023.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Custos de Infraestrutura de Transporte, 1º edição – Volume 01: Metodologia e Conceitos, Departamento Nacional de Infraestrutura



DOI: [10.29327/1430212.49-108](https://doi.org/10.29327/1430212.49-108)

**INFLUÊNCIA DAS CHUVAS NA IMPRODUTIVIDADE DE OBRAS DE
TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO NA CIDADE DE ARACAJU/SE**

de Transportes, Diretoria Geral, Diretoria Executiva, Coordenação Geral de Custos de Infraestrutura de Transportes, Brasília, 2017.

DUARTE, T. L. S.; SANTOS, G. C.; CASTELHANO, F. J. Eventos de chuvas extremas associados aos riscos de inundações e de alagamentos em Aracaju/SE. Geosaberes, [S.L.], v. 12, p. 256, 20 jun. 2021. Revista Geosaberes. <http://dx.doi.org/10.26895/geosaberes.v12i0.1089>.

EL-RAYES, K.; MOSELHI, O. Impact of rainfall on the productivity of highway construction. Journal of construction engineering and management, v. 127, n. 2, p. 125-131, 2001.

FARIAS, B. de B. Impacto das chuvas no cronograma físico-financeiro de obras: estudo de caso de construtoras em Pernambuco. 2022. 27 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2022.

FORD, G.; PATTERSON, J.; SIMS, B. How to Determine Construction Project Rain Delay Times Using Local Rainfall Databases in Asheville, NC. In: Construction Research Congress 2009: Building a Sustainable Future. 2009. p. 380-385.

FORMENTINI, L. Análise dos fatores que afetam a programação de obras: estudo de caso na cidade de Toledo-PR. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MATTOS, A D. Gestão de custos de obra: Conceitos, boas práticas e recomendações. São Paulo: Editora Pini 2016.

PAN, N. Assessment of productivity and duration of highway construction activities subject to impact of rain. Expert Systems With Applications, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 313-326, fev. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2004.10.011>

PAN, N.; HADIPRIONO, F. C.; WHITLATCH. A fuzzy reasoning knowledge-based system for assessing rain impact in highway construction scheduling: Part 1. Analytical model. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, v. 16, n. 3, p. 157-167, 2005.

ROCHA, G. B. L. Avaliação dos custos da administração local de obras rodoviárias com o novo sistema de custos referenciais de obras do DNIT - SICRO. 2018. 131f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) Universidade de Brasília, Brasília, 2018.



GLASS FIBRE GRID REINFORCED BITUMINOUS PAVEMENTS – FIELD STUDY

Abhijith B.S¹; Stepan Bohus²; Kavitha G³; Atul Narayan S P⁴ & Veeraragavan A⁵

RESUMO

O trincamento de superfícies betuminosas é um problema comum observado na maioria das estradas em todo o mundo. Quando uma nova camada betuminosa é aplicada sem solucionar as trincas na superfície betuminosa existente, as tensões de cisalhamento e de tração geradas pelas cargas de tráfego ou gradientes de temperatura podem resultar na propagação de trincas para a superfície de uma nova camada. O uso de soluções de reforço intercadas, como grades de fibra de vidro, que fornecem maior resistência à tração em uma menor tensão de tração, provou ser eficaz em termos de retardar a propagação de trincas através de vários testes laboratoriais. O presente estudo centra-se na corroboração de resultados laboratoriais através da avaliação do desempenho em campo de seções reforçadas com grade de fibra de vidro ao longo de um período de tempo. O desempenho relativo de revestimentos de mistura asfáltica em trechos de estradas de um projeto de Rodovia Nacional da Índia com e sem grades de fibra de vidro foi estudado ao longo de dois anos, por meio de avaliação periódica do desempenho das condições estruturais e funcionais. A abordagem de aprendizado de máquina foi usada para classificar e agrupar diferentes seções com e sem grades de fibra de vidro para identificar e agrupar as seções com base no desempenho. As descobertas desta pesquisa são um aspecto integrante da consideração do reforço da grade de fibra de vidro do ponto de vista da manutenção do pavimento.

PALAVRAS-CHAVE: Grades de fibra de vidro; resistência à trincas; análise da bacia de deflexão; técnica de agrupamento.

ABSTRACT

Cracking of bituminous surfaces is a common distress seen in the majority of roads across the world. When a new bituminous overlay is provided without addressing the cracks in the existing bituminous surface, shear and tensile stresses generated by traffic loads or temperature gradients can result in the propagation of cracks to the surface of a new layer. Using interlayer reinforcement solutions such as glass fibre grids, which provide higher tensile strength at lower tensile strain, has proven to be effective in terms of delaying crack propagation through various laboratory investigations. The current study focuses on corroborating laboratory results through field performance evaluation of glass fibre grid-reinforced sections over a period of time. The relative performance of asphalt mixture overlays on an Indian National Highway project road sections with and without glass fibre grids was studied over an year, through periodic structural and functional condition performance evaluation. Machine Learning Approach was used to rank and cluster different sections with and without glass fibre grids to identify and group the sections based on performance. The findings from this investigation are an integral aspect of the consideration of glass fibre grid reinforcement from the pavement maintenance point of view.

KEY WORDS: Glass fibre grids; cracking resistance; deflection bowl analysis; Clustering technique.

^{1,2} Saint-Gobain Adfors, Abhijith.BS@saint-gobain.com ; Stepan.bohus@saint-gobain.com ,

³ RASTA Center for Road Technology, India, gkavitha@rastaindia.com

^{4,5} Indian Institute of Technology Madras, India, atulnryn@iitm.ac.in ; aveeraragavan@gmail.com



DOI: [10.29327/1430212.49-107](https://doi.org/10.29327/1430212.49-107)

GLASS FIBRE GRID REINFORCED BITUMINOUS PAVEMENTS – FIELD STUDY

INTRODUCTION

The occurrence of bituminous surface cracks remains a significant concern on roads across the world. These cracks are classified into various types based on their frequency and severity. Timely crack sealing is imperative to prevent their further expansion. Notably, Glass fibre grid interlayer has demonstrated remarkable effectiveness as a crack retarder when placed between existing damaged bituminous pavement and the bituminous mixture overlay (Nguyen et al., 2013; Graziani et al., 2014). Glass fiber has Young's modulus of approximately 70 GPa, which is almost 20 times higher than typical asphalt concrete modulus at around 20°C, and high tensile strength (Darling and Woolstencroft, 2004).

Glass fiber grids possess the capability to achieve high tensile strength at low deformations, significantly enhancing the fatigue performance of bituminous pavements (Asphalt Academy, 2022). The use of glass fiber grids is not uncommon and has been recognized as a viable option for reinforcing bituminous layers in many counties (Roy, S. and Dixit, M., 2019; Nithin, S., Rajagopal, K. and Veeraragavan, A., 2015). Various mechanisms have been proposed in the literature highlighting how glass fiber grids benefit bituminous pavements (Lytton 1989; Dhakal, N., Elseifi, M.A. and Zhang 2016). The reinforcement mechanism is evident when the glass fibre grid material exhibits a higher modulus than the overlay. In reinforcement, cracks initiated from the old pavement are observed to reach the grid interface and propagate horizontally beneath it until the fracture energy dissipates. Additionally, Safavizadeh et al. (2015) describe a strain-relieving mechanism where cracks from the existing pavement propagate vertically and come to a halt at the bottom of the grid interface. Subsequent application of repeated loads initiates cracks on the upper portion of the grid interface, which then spread through the overlay.

Numerous laboratory investigations have been conducted on glass fiber grid-reinforced bituminous mixtures, showcasing the performance of this system (Arsenie et al., 2017; Safavizadeh, S.A., Cho, S.H. and Kim, Y.R., 2022; Abhijith et al., 2023). Fatigue of bituminous mixtures reinforced with glass fibre grids are usually evaluated in the laboratory with four-point bending fatigue tests. These fatigue tests are conducted at multiple strain levels with different loading waveforms - sinusoidal and haversine. The fatigue life of glass fibre grid-reinforced mixtures was found to be at least three times higher, specifically when the mixtures were subjected to higher strain levels. Furthermore, the experimental investigation carried out on glass fibre grid inlaid bituminous mixtures by Canestrari et al., (2015) has shown that geogrid reinforcement does not noticeably influence the flexural stiffness and strength in the pre-cracking phase, whereas the crack propagation speed can be significantly reduced and the failure behavior may change from quasibrittle to ductile, depending on the interlayer shear resistance. These laboratory results were corroborated by periodic visual observation of field performance in terms of reflective cracking evolution. Bohus S., Pavel, S. and Jan, K., (2023) show interlayer bond strength between bituminous mixtures and glass fibre grid to depend mainly on tack coat type and the solid bitumen content in the emulsion being used.

Nguyen et al., (2013) conducted full-scale tests on grid-reinforced pavements at the IFSTTAR APT facility. The conclusions from this study has enhanced the understanding of grid-inlaid bituminous mixtures. The tests on pavement structures with and without grids have verified that placing a glass fiber grid near the bottom of the bituminous layer markedly enhances fatigue life, provided a strong bonding with the bituminous layer is achieved. While there are good amount



of works carried out to prove the efficiency of glass fibre grids in reinforcing bituminous mixtures, it will be interesting to monitor and assess the performance of grid-inlaid sections under mixed traffic and environmental conditions from a real field perspective. This study focuses on the functional and structural evaluation of glass fibre grid-reinforced sections from a National Highway section in India.

MATERIALS AND METHODS

The study is confined to the performance evaluation of the pavement sections constructed with and without a glass fibre grid for a period of one year (three cycles) covering all the seasons. The data collection methodology covers different environmental conditions to which the pavement with glass fibre grids are subjected to and compares the relative performance through structural and functional evaluation studies. This National Highway project (NH 75) for four laning of the 77.228 km stretch between Devihalli and Hassan in Karnataka, India, has been executed by Devihalli Hassan Tollway Private Limited (DHTPL), on Design, Built, Finance, Operate, and Transfer (DBFOT) basis. The project corridor stretches from Devihalli village in Karnataka, India at Km 108.456 and traverses towards the West, connecting Hirisave, Channarayapatna, and Shantigrama and ends at Hassan district in Karnataka at Chainage 186.684 Km (Approximately 77.228 Km). The map of the road is shown in Figure 1. The commercial operations commenced on the project road in November 2013. The concession period for the project is 30 years.

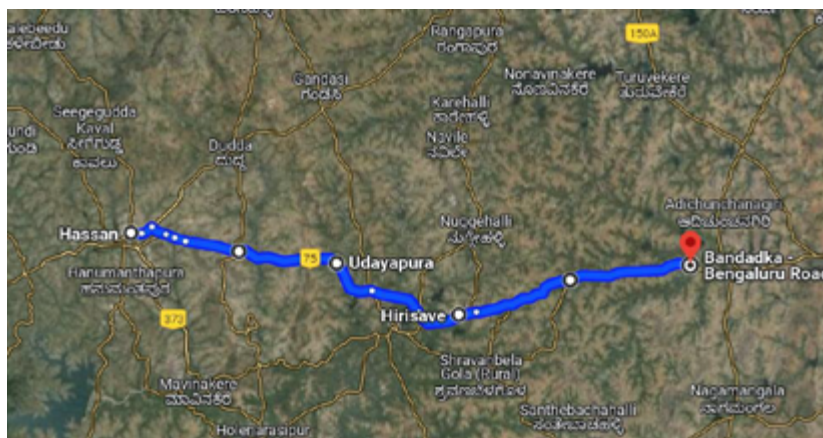


Figure 1. Map of project corridor

Glass fibre grids were used in chosen sections along this highway as part of a rehabilitation strategy in 2018. Glass fibre grids were used on sections where severe alligator cracks were observed, as shown in Figure 2. First, the existing top wearing course layer, Bituminous concrete (BC), was milled. After milling operation, Glass fibre grids was laid on surfaces that had extensive cracks and overlaid with new BC layer. At places where the surface had no distresses after milling, conventional BC overlay was placed without the application of Glass fibre grids. Hence the condition of the pavement before the application of bituminous mixture overlay was different for both the conventional and Glass fibre grids sections. Figure 3 shows the application of CGL on milled surface.



DOI: 10.29327/1430212.49-107

GLASS FIBRE GRID REINFORCED BITUMINOUS PAVEMENTS – FIELD STUDY



Figure 2. Alligator cracks on wearing course before the application of CGL

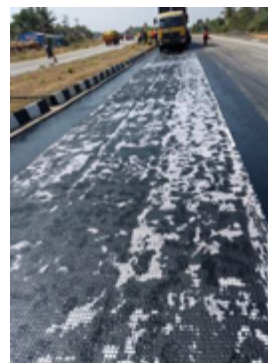


Figure 3. Application of CGL on milled surface

The composite glass fibre grid supplied by Saint Gobain Adfors, referred to as CGL, was evaluated and reported. These grids have a peak tensile strength of $115 \times 115 \pm 15$ kN/m at a tensile elongation value of 2.5 ± 0.5 % in both warp and weft directions. The glass fibre grids are coated with an elastomeric polymer with a melting point of coating to be higher than 230°C . The coating is reported to protect the glass fibre grid from damage during installation by Orešković et al. (2019). Technical characteristics of CGL are shown in Table 1.

Table 1. Technical characteristics of GlasGrid™ CGL

Asphalt reinforcement specification (Composite GlasGrid CG100L)			
Grid coating	Thermal stable elastomeric polymer		
Melting point of grid protective coating	$\cong 250$	$^{\circ}\text{C}$	ASTM D276/EN ISO 3146
Melting point of Glass	$\cong 820$	$^{\circ}\text{C}$	ASTM C338
Tensile strength (MD \times CMD)	$\cong 100 \times 100$	kN/m	ASTM D6637/EN ISO 10319
Tensile Elongation Ultimate	2.5 ± 0.5	%	ASTM D6637/EN ISO 10319
Tensile Resistance at 2% strain (MD \times CMD)	$\cong 95 \times 95$	kN/m	ASTM D6637/EN ISO 10319
Young's modulus	73000	MPa	



Mass per unit area	≥ 535	g/m ²	ASTM D5261/EN ISO 9864
Installation nonwoven backing (weight)	≥ 35	g/m ²	EN ISO 9864
Installation nonwoven backing (dynamic perforation)	≥ 30	mm	EN ISO 13433
Residual strength after installation damage test	≥ 80	%	EN ISO 10722
Maximum junction strength	≥ 50	N	EN ISO 13426-2/ASTM D 7737
Note: MD – Machine direction ; CMD – Cross Machine direction			

The objective of the study is to understand the effectiveness of crack sealing technology with CGL at different time intervals in an in-service highway pavement.

The first cycle of data collection corresponding to functional and structural conditions was started in December 2021. The second and third cycle of data collection was completed within a span of 1 year. The data collection includes roughness measurements, the percentage area of distresses such as cracking and rutting, deflection bowl, and extracted bituminous core sample analysis.

PAVEMENT FUNCTIONAL AND STRUCTURAL CONDITION

Alligator Cracks

The density of alligator cracking along the project road overlaid with bituminous concrete and GlasGrid™ CGL was compared with the conventional section, as shown in Figure 4. The mean value of the extent of alligator cracks was observed to be relatively lower in the case of sections overlaid with Bituminous Concrete + GlasGrid™ CGL in comparison to conventional sections. It is noted that after three study cycles, it was found that the GlasGrid™ section CGL section (applied to a severely cracked surface), had 2.49% cracking on average, while the conventional section had 5.55% cracking (no initial cracks). Without GlasGrid™ CGL, cracks would have propagated faster, leading to significantly higher crack percentages than in the GlasGrid sections. This appears to indicate the effectiveness of the use of GlasGrid™ CGL in retarding distress.

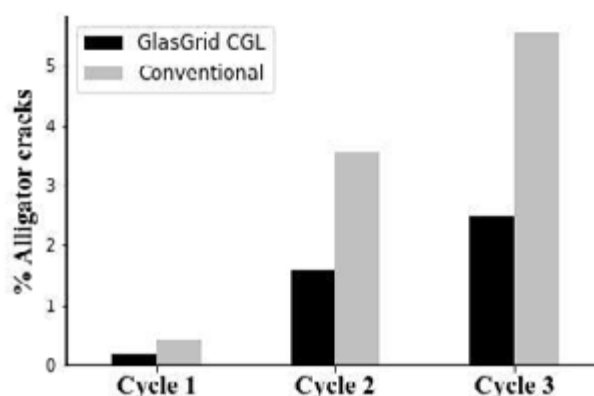


Figure 4. The evolution of alligator cracks over a period of time for GlasGrid™ CGL and conventional section



DOI: 10.29327/1430212.49-107

GLASS FIBRE GRID REINFORCED BITUMINOUS PAVEMENTS – FIELD STUDY

Crack Investigation on Extracted Cores

During the third cycle of the study, cores were extracted to observe the crack pattern. The investigation aimed to analyze the crack patterns and assess the effectiveness of the CGL interlayer in preventing the propagation of cracks. Cores were extracted from cracked locations of both CGL and conventional road sections for a detailed examination of crack propagation patterns. Figure 5 and Figure 6 show the crack propagation patterns in extracted cores. On observing the crack patterns, it is evident that the GlasGrid™ CGL interlayer demonstrates effectiveness in arresting bottom-up crack propagation. The cracks observed in CGL interlayer sections were also top-down cracks, which can appear due to the age hardening of the wearing course material. In contrast, the cracks observed in the conventional sections have propagated either from the binder course to the wearing course layer or vice versa i.e. the top-down cracking from the surface has reached the bottom of the bituminous layers and the bottom-up cracking has reached the surface.

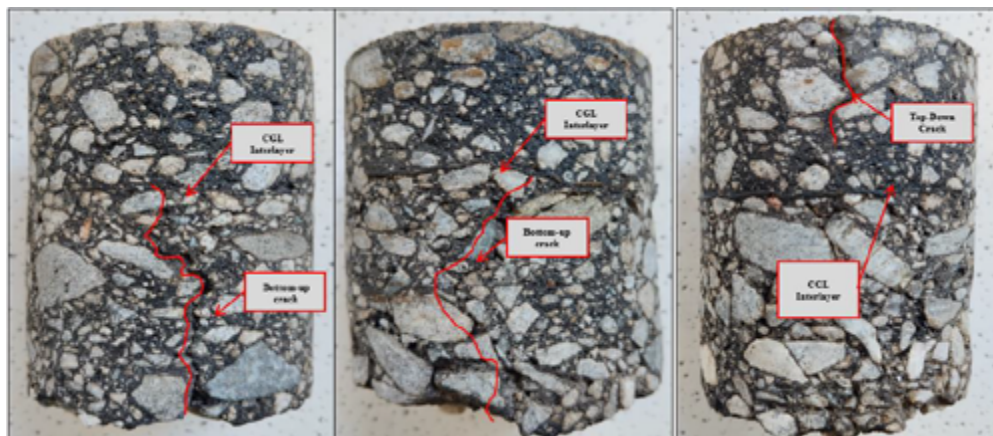


Figure 5. Retardation of crack growth due to GlasGrid™ CGL interlayer

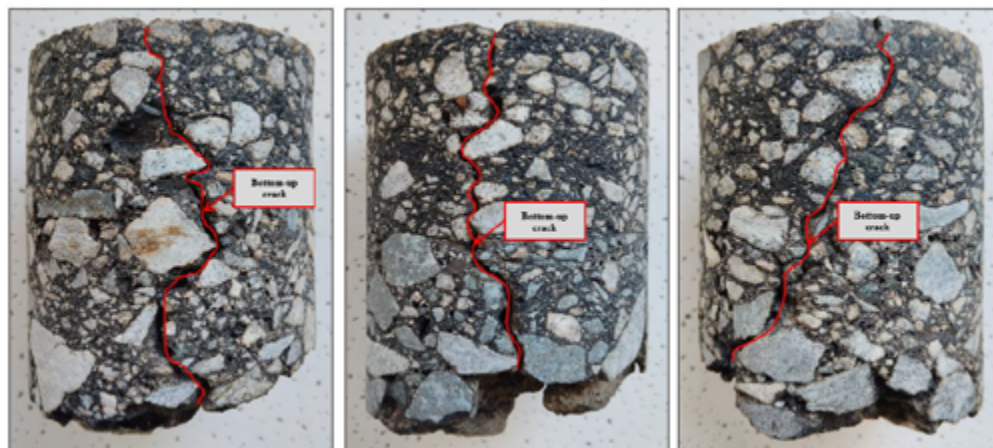
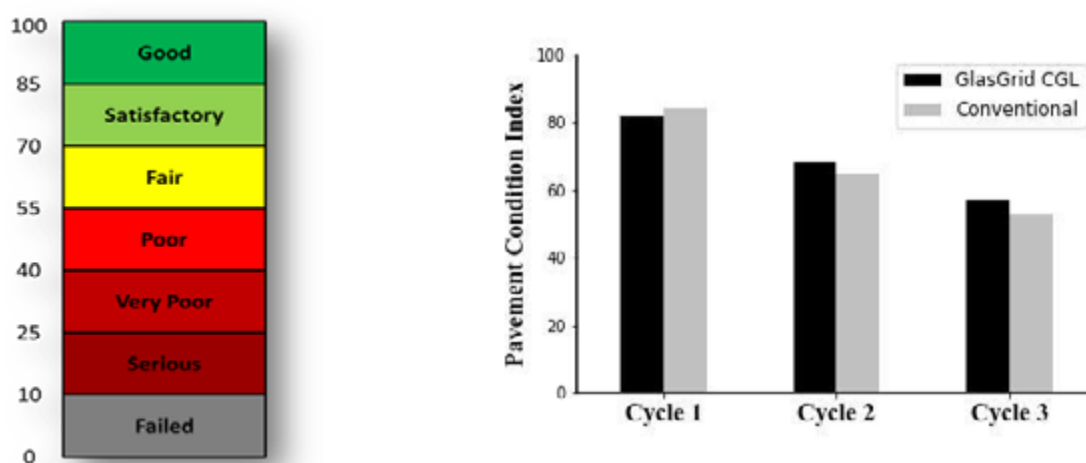


Figure 6. Crack propagation pattern in conventional pavements without reinforcement



Pavement Condition Index (PCI)

The pavement condition index is a numerical value given, based on the assessment of the road condition visually. PCI is calculated for the prediction of performance and suggests necessary maintenance or rehabilitation measures to treat the existing surface defects. It is a standard measure that describes the current situation of the road. For calculating PCI, the procedure mentioned in ASTM D6433-20 is followed. In the present study, condition indices for different road stretches are calculated. PCI numerical values range from 0 to 100, 0 being failed and 100 being good condition.



(a) PCI rating scale (b) PCI across 3 cycles
Figure 7. Pavement condition index for GlasGrid™ CGL and unreinforced section.

Figure 7a shows the standard PCI rating scale, and Figure 7b shows the comparison of PCI values observed across 3 cycles for both the GlasGrid™ CGL sections and conventional sections. The mean PCI values indicate that the GlasGrid™ CGL section consistently shows higher values across all three cycles compared to the Conventional section. Both sections exhibit a decreasing trend in mean PCI values over time, suggesting degradation of pavement condition. However, the important point to be noted is that if there were no GlasGrid™ CGL interlayer, PCI would have decreased at a much faster rate at those sections where GlasGrid™ CGL is currently placed. This is because GlasGrid™ CGL is placed on sections where severe alligator cracks were observed. With the inclusion of GlasGrid™ CGL in these severely cracked sections, PCI has decreased at a lower rate due to the reinforcement effect.

Deflection Bowl Study

Dynamic load that simulates closely the duration and amplitude of load pulses produced by moving wheel load was applied to the conventional pavement sections and GlasGrid CGL interlayer sections during the first cycle of data collection. A falling weight deflectometer (FWD) was used to apply a peak load of 40 kN, which corresponds to the load on one dual wheel set of an 80 kN



DOI: 10.29327/1430212.49-107

GLASS FIBRE GRID REINFORCED BITUMINOUS PAVEMENTS – FIELD STUDY

standard axle load. The duration of an impulse load remains roughly equivalent to the time it takes to cross the length of a tyre imprint at a speed of around 60 km/h, falling within the span of 20 to 30 ms.

Figure 8a shows the working principle of FWD. Surface deflections are measured at different radial locations. Figure 8b shows an example of the shape of the deflection bowl observed between conventional and GlasGrid™ CGL section. The peak deflections are found to be much higher for conventional sections in comparison to GlasGrid™ CGL sections indicating good structural health of the pavement when reinforcement is used.

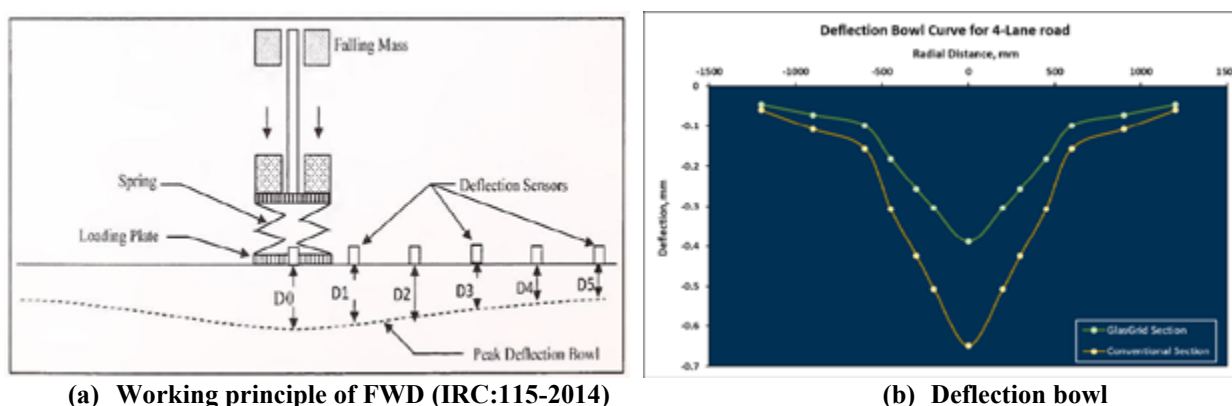


Figure 8. Falling weight deflectometer test carried out on GlasGrid™ CGL and unreinforced section.

The deflections measured from the FWD test are used to plot the deflection bowl basin and some characteristic features of the deflection bowl basin are determined which can be correlated to pavement structural condition and deterioration. The following Deflection bowl parameters have been determined:

- D0 – Maximum Deflection measured at the center of the loading plate of 300 mm diameter.
- SCI – Surface Curvature Index = $\Delta_0 - \Delta_r$, where Δ_0 – max deflection and Δ_r - deflection are measured at a distance of 500 mm from the point of application of load.
- BCI - Base Curvature Index = $\Delta_2 - \Delta_3$, where Δ_2 = deflection at a distance of 610 mm and Δ_3 = deflection at a distance of 915 mm from the point of application of load.
- BDI – Base Damage Index = $\Delta_1 - \Delta_2$, Where Δ_1 = deflection at 305 mm, Δ_2 = deflection at a distance of 915 mm from the point of application of load.
- Slope of deflection bowl – It is the slope of the line joining the point of maximum deflection to the point of inflexion of the deflection bowl.

Table 2 provides the summary of deflection bowl characteristics observed between conventional and GlasGrid™ CGL sections. All the indices were observed to indicate the efficiency of the GlasGrid™ CGL section to contribute towards the enhancement of pavement load-carrying capacity. The peak deflections indicate that the deflections are reduced by up to 13% in comparison to conventional sections. However, if the conventional sections also had severe cracks like GlasGrid sections, the difference in deflections could have been much higher


Table 2. Summary of deflection bowl characteristics

Type of Pavement	Deflection Bowl Parameter	Mean	Standard Deviation
Saint-Gobain GlasGrid sections	D ₀	0.43	0.10
	SCI	0.15	0.05
	BDI	0.17	0.04
	BCI	0.03	0.01
	Slope	0.03	0.01
Conventional sections	D ₀	0.49	0.21
	SCI	0.17	0.08
	BDI	0.21	0.10
	BCI	0.03	0.01
	Slope	0.04	0.02

DATA GROUPING USING CLUSTERING TECHNIQUES

Clustering is a popular technique in the field of data analysis that aims to identify inherent patterns and groupings within a dataset. It is particularly useful when dealing with large datasets or when the underlying structure of the data is not explicitly known. The K-means clustering algorithm is one of the commonly used methods for partitioning data into clusters. In K-means clustering, the algorithm iteratively assigns data points to clusters based on their proximity to cluster centroids, which are the mean values of the data points within each cluster. The number of clusters, referred to as K, is predetermined. The algorithm aims to minimize the within-cluster sum of squares, seeking to create clusters with high similarity among their constituent data points and low similarity between different clusters. The output of the K-means clustering process is a set of K clusters, where each data point is assigned to a specific cluster based on its similarity to the cluster centroid. This allows for the exploration and understanding of inherent groupings within the data. The clustering exercise was performed using the K-means method on the obtained field data of both GlasGrid™ CGL and Conventional sections. The goal was to group sections based on their performance in terms of remaining modulus of bituminous layer (E_{bit}), pavement condition index (PCI) and roughness index obtained from the field study. The analysis was conducted using **RStudio 2023.03.0 Build 386 software**. The analysis resulted in the identification of 2 as the optimum number of clusters. This means that the sections were divided into two distinct groups based on their similarities in the aforementioned parameters. A cluster diagram for the analyzed data is represented below in Figure 9.



DOI: 10.29327/1430212.49-107

GLASS FIBRE GRID REINFORCED BITUMINOUS PAVEMENTS – FIELD STUDY

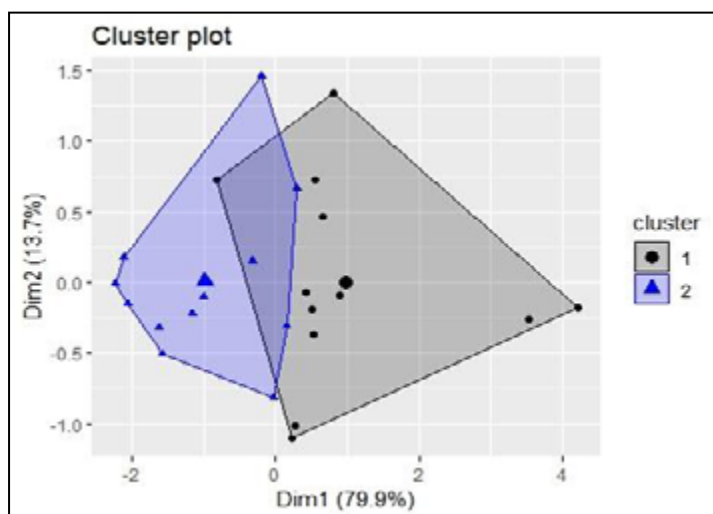


Figure 9. Cluster plot based on field data collected for both the conventional and GlasGrid™ CGL sections

Table 3. Summary statistics of the cluster

Summary statistics for cluster 1:				Summary statistics for cluster 2:			
	E _{bit}	PCI	Roughness		E _{bit}	PCI	Roughness
Min	450	52	1094	Min	1188	72	830
1st Quartile	965.2	78	1364	1st Quartile	1594	81.25	945
Median	1184	81.5	1584	Median	1826	89	1147
Mean	1127.2	79	1611	Mean	1748	89	1129.7
3rd Quartile	1297.5	85	1746	3rd Quartile	1923	99	1206
Max	1666	99	2315	Max	2047	99	1599

From Table 3, it is clearly seen that Cluster 2 demarcates itself in terms of higher mean values of E_{bit} and PCI and lower values of Roughness, which in turn connotes the most favourable performance. This cluster contained 12 sections. On the other hand, Cluster 1 exhibited relatively lower mean values of E_{bit} and PCI and higher Roughness, indicating less favourable performance. This cluster also included 12 sections. Interestingly, the analysis revealed that Cluster 2, the most favourable cluster, consisted of 83% GlasGrid™ CGL sections and only 17% Conventional sections. This highlights a clear dominance of GlasGrid™ CGL sections in terms of higher performance.

CONCLUSION

It is to be noted that the surface condition of the pavement before the application of bituminous mixture overlay was different for both the conventional and GlasGrid™ CGL sections. First, the existing top wearing course layer was milled, and the GlasGrid™ CGL was laid on surfaces that had extensive cracks and overlaid with the 50 mm thick wearing course layer. However, at places where the surface had no distresses after milling, conventional wearing course overlay was placed without the application of grid interlayer. For instance, after three study cycles, it was found that the



GlasGrid™ CGL section (applied to a severely cracked surface), had 2.49% cracking on an average, while the conventional section had 5.55% cracking (no initial cracks). Without GlasGrid™ CGL, cracks would have propagated faster, leading to significantly higher crack percentages in the GlasGrid sections. Hence, the performance results between GlasGrid™ CGL and conventional sections in this article should not be directly compared due to differing initial conditions before the application of conventional wearing course overlay versus GlasGrid™ CGL + wearing course overlay. Following are some of the important conclusions from the investigation:

- The study findings demonstrate that the GlasGrid™ CGL interlayer effectively arrests the propagation of cracks and acts as an efficient crack relief layer. Core samples taken from the site reveal the crack propagation pattern in both conventional sections and GlasGrid™ CGL sections. Without reinforcement interlayers, cracks from the lower layer propagate to the surface at a faster rate, consequently reducing the lifespan of the overlay. After 4 years from the time of application of GlasGrid™ CGL, predominant bottom-up cracks were observed in conventional sections while GlasGrid™ CGL has prevented the growth of cracks from the bottom bituminous layer to the overlay effectively.
- The mean PCI values calculated as per ASTM D6433 indicate that the GlasGrid section consistently shows higher values across all three cycles compared to the Conventional section. For instance, the PCI value for GlasGrid™ CGL sections decreased by 16% from the second cycle of data collection to the third cycle, while the PCI reduced by 18% for conventional sections. The point to be noted is despite better initial conditions with low to minimal cracks before the overlay, PCI for conventional sections is decreasing at a faster rate in comparison to GlasGrid sections. This highlights the influence of the crack retarding ability of GlasGrid™ CGL.
- The shape of the deflection bowl and the deflection bowl parameters suggest that the GlasGrid™ CGL sections exhibit better structural strength / load-carrying capacity compared to the conventional sections. Peak deflections were found to be as high as 13% for the conventional sections in comparison to GlasGrid™ CGL sections. However, there cannot be a direct comparison between conventional and GlasGrid™ CGL sections due to initial differing conditions on which the bituminous overlay work was carried out. If the conventional sections had similar severity of cracks like GlasGrid™ CGL sections, the difference in deflection % would have been much higher than the current observation of 13%.
- Clustering using K-means unsupervised machine learning algorithm confirmed the dominance of GlasGrid™ CGL sections with 83% in favourable performance cluster (lower roughness index, higher remaining modulus of bituminous layers, and higher pavement condition index), while Conventional sections had only 17% in the cluster.

In summary, the study results affirm the effectiveness of the GlasGrid™ CGL interlayer in enhancing pavement performance by reducing distresses such as cracks and improving both pavement condition index and structural capacity.



DOI: [10.29327/1430212.49-107](https://doi.org/10.29327/1430212.49-107)

GLASS FIBRE GRID REINFORCED BITUMINOUS PAVEMENTS – FIELD STUDY

REFERENCES

1. Abhijith, B.S., Raj, A., Varma, R., Ayyar, P. and Krishnan, J.M., 2023. Influence of glass fibre grid and its placement on the fatigue damage of asphalt mixture. *Materials and Structures*, 56(7), p.140.
2. ASTM D6433 (2020). Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM International, West Conshohocken
3. Bohus, S., Pavel, Sperka. and Jan, Kudrna., 2023. Investigations on shear bond characteristics of grid reinforced asphalt concrete. XXVIIth World Road Congress, Prague (Czech Republic).
4. Arsenie, I.M., Chazallon, C., Duchez, J.L. and Hornyh, P., 2017. Laboratory characterisation of the fatigue behaviour of a glass fibre grid-reinforced asphalt concrete using 4PB tests. *Road Materials and Pavement Design*, 18(1), pp.168-180.
5. Asphalt Academy (2022) Technical guidelines for road construction (TG3), 3rd edn. South African Bitumen Association (Sabita), South Africa.
6. Canestrari, F., Belogi, L., Ferrotti, G. and Graziani, A., 2015. Shear and flexural characterization of grid-reinforced asphalt pavements and relation with field distress evolution. *Materials and Structures*, 48, pp.959-975.
7. Darling, J.R. and Woolstencroft, J.H., 2004, May. A study of fiber glass pavement reinforcement used in different climatic zones and their effectiveness in retarding reflective cracking in asphalt overlays. In *Cracking in Pavements: Mitigation, Risk Assessment and Prevention*, Proceedings the 5th International RILEM Conference, Limoges, France (pp. 5-8).
8. Dhakal, N., Elseifi, M.A. and Zhang, Z., 2016. Mitigation strategies for reflection cracking in rehabilitated pavements—A synthesis. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(3), pp.228-239.
9. Graziani, A., Pasquini, E., Ferrotti, G., Virgili, A. and Canestrari, F., 2014. Structural response of grid-reinforced bituminous pavements. *Materials and structures*, 47, pp.1391-1408.
10. IRC115 (2014). "Guidelines for Structural Evaluation and Strengthening of Flexible Road Pavements Using Falling Weight Deflectometer (FWD) Technique., Indian Roads Congress, New Delhi, India. "
11. Lytton RL (1989) Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete. *Geotext Geomembr* 8(3):217–237
12. Nguyen, M.L., Blanc, J., Kerzrého, J.P. and Hornyh, P., 2013. Review of glass fibre grid use for pavement reinforcement and APT experiments at IFSTTAR. *Road Materials and Pavement Design*, 14(sup1), pp.287-308.
13. Nithin, S., Rajagopal, K. and Veeragavan, A., 2015. State-of-the art summary of geosynthetic interlayer systems for retarding the reflective cracking. *Indian geotechnical journal*, 45, pp.472-487.
14. Roy, S. and Dixit, M., 2019. Use of glass grid and sami as reinforced interlayer system in runway. In *Geotechnics for Transportation Infrastructure: Recent Developments, Upcoming Technologies and New Concepts*, Volume 2 (pp. 283-294). Springer Singapore.
15. Safavizadeh, S.A., Wargo, A., Guddati, M. and Kim, Y.R., 2015. Investigating reflective cracking mechanisms in grid-reinforced asphalt specimens: Use of four-point bending notched beam fatigue tests and digital image correlation. *Transportation Research Record*, 2507(1), pp.29-38.
16. Safavizadeh, S.A., Cho, S.H. and Kim, Y.R., 2022. Interface shear strength and shear fatigue resistance of fibreglass grid-reinforced asphalt concrete test specimens. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(8), pp.2531-2542.



CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADOS EM PAVIMENTAÇÃO DE VIA URBANA EM CIDADE NO INTERIOR DO CEARÁ

Mariana de Araújo Leite¹; Silvio Rocha Ferreira Neto²; Lucas Cavalcante de Almeida³; José Wémenson Rabelo Chaves³ & Francisco Heber Lacerda de Oliveira³

RESUMO

Diante dos desafios enfrentados pela infraestrutura rodoviária urbana no Brasil, a pavimentação com blocos de concreto intertravados pode se apresentar como uma alternativa vantajosa em termos de custos, execução e desempenho. A necessidade de investigar a eficácia dessa solução motiva o presente estudo, que visa caracterizar o processo de execução da pavimentação com blocos de concreto intertravados em uma via urbana de uma cidade do interior do Ceará. Este estudo realiza uma análise técnica baseando-se nos critérios estabelecidos pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e nas diretrizes da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Foram realizadas visitas ao local da obra, com extensão de 220 m, além de análises dos projetos e dos processos executivos, e interações com os gestores, visando verificar a conformidade dos serviços executados com as diretrizes técnicas. Os resultados indicam que a execução atende parcialmente às normas, necessitando de ajustes para alinhar a obra às exigências normativas e técnicas. Além dos ajustes nas práticas executivas, recomenda-se também a adoção de práticas de manutenção preventiva para preservar a integridade do pavimento ao longo de sua vida útil. As conclusões sugerem que seguir essas orientações pode melhorar a qualidade e durabilidade da pavimentação intertravada, sendo essencial o rigor na execução e a observância das normas técnicas para o sucesso de futuros projetos de pavimentação intertravada.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento intertravado; Blocos de concreto; *Checklist*.

ABSTRACT

Given the challenges encountered by urban road infrastructure in Brazil, pavement using interlocking pavers emerges as a potentially advantageous alternative in terms of cost-effectiveness, implementation, and performance. The need to investigate the efficacy of this solution motivates the present study, which seeks to characterize the execution process of interlocking paver pavement on an urban roadway in an interior city of Ceará. This study conducts a technical analysis based on the standards established by the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT) and the directives from the Brazilian Portland Cement Association (ABCP). Site inspections were carried out at the construction site, spanning 220 meters, in addition to the evaluation of project designs and executive processes, and consultations with project managers, to ascertain the adherence of the completed services to the technical guidelines. The findings indicate that the implementation partially complies with the standards, necessitating adjustments to align the construction with regulatory and technical requirements. In addition to modifications in the execution practices, the implementation of preventive maintenance practices is also recommended to maintain the integrity of the pavement throughout its service life. The conclusions advocate that adherence to these guidelines can enhance the quality and durability of interlocked pavement, emphasizing that rigorous execution and compliance with technical standards are critical for the success of future interlocked paving projects.

KEY WORDS: Interlocking pavement; Paver; Checklist.

¹ Centro Universitário Católica de Quixadá (Unicatólica), marianaleite@unicatolicaquixada.edu.br.

² Instituto Federal do Ceará (IFCE) Campus Quixadá, silvio.rocha.ferreira07@aluno.ifce.edu.br.

³ Universidade Federal do Ceará (UFC), wemenson.chaves@det.ufc.br; lucascavalcante@det.ufc.br; heber@det.ufc.br.



DOI: [10.29327/1430212.49-102](https://doi.org/10.29327/1430212.49-102)

CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADOS EM PAVIMENTAÇÃO DE VIA URBANA EM CIDADE NO INTERIOR DO CEARÁ

INTRODUÇÃO

No contexto brasileiro, a infraestrutura de transportes desempenha um papel importante no desenvolvimento socioeconômico. Entretanto, muitas cidades enfrentam problemas com a degradação de suas vias urbanas, influenciando diretamente na qualidade de vida e na eficiência econômica. Nesse cenário, a pavimentação com blocos de concreto intertravados surge como uma solução promissora, oferecendo benefícios em termos de custos, durabilidade e desempenho quando comparada às alternativas tradicionais, como revestimentos asfálticos.

O uso crescente desse tipo de pavimentação reflete uma tendência global de busca por práticas de construção mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis. Segundo Bezerra e Oliveira (2023), o emprego da pavimentação com blocos de concreto intertravados está cada vez mais presente na construção civil, especialmente em grandes cidades. Contudo, essa realidade também está presente em cidades menores, como municípios no interior do Brasil.

Nesse sentido, este estudo foi centrado em uma caracterização técnica da implementação de pavimento intertravado em uma cidade do interior do Ceará, uma região que reflete as características e desafios típicos de áreas urbanas em expansão no país. A investigação buscou também entender como a obra estudada se alinha às normativas técnicas nacionais, caracterizando o processo de forma a servir de referência para outras localidades com desafios semelhantes. Com o aumento da urbanização e os desafios decorrentes do crescimento demográfico e das mudanças climáticas, torna-se essencial adotar métodos de construção que não só atendam às demandas atuais, mas, também, antecipem necessidades futuras. O interesse pelo uso de blocos de concreto intertravados está alinhado com essa perspectiva, propondo uma abordagem que combina eficiência operacional com menor impacto ambiental.

Entretanto, ao utilizar desse tipo de pavimentação, é preciso que os responsáveis pela execução se certifiquem que ela está seguindo os padrões e as técnicas necessárias para que o pavimento alcance o desempenho designado. Essa verificação deve considerar tanto as orientações da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) como as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), associadas a esse tipo de pavimento.

MÉTODO DE PESQUISA

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e descritiva para explorar as práticas de execução da pavimentação com blocos de concreto intertravados em rua em uma cidade no interior do Ceará. A investigação foi embasada em conceitos teóricos extraídos de uma revisão de literatura, incluindo manuais, artigos e normas técnicas, para fundamentar as observações feitas no local da obra. O foco está em identificar e analisar eventuais discrepâncias entre as teorias e diretrizes estabelecidas e sua aplicação prática no campo, visando entender as razões para essas variações e sugerir possíveis melhorias para garantir a qualidade e a durabilidade do pavimento.

Inicialmente, definiu-se o problema de pesquisa com base na relevância da correta execução de pavimentos intertravados, uma necessidade evidenciada pelas diretrizes da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2022) e pelas normas técnicas pertinentes. Essa definição orientou todo o



processo investigativo. A segunda etapa consistiu na revisão bibliográfica, que permitiu estabelecer um marco teórico sobre as melhores práticas de pavimentação e os padrões técnicos recomendados.

Considerações Sobre a Pesquisa Bibliográfica

Entende-se, segundo critérios da ABCP (2010), que a pavimentação intertravada é composta por blocos de concreto pré-moldados e por contenção lateral que impede o deslocamento dos blocos, proporcionando o intertravamento. Estes devem ser assentados em um lastro de areia ou pó de pedra, na granulometria recomendada, cuja função é transmitir os esforços nos blocos de concreto para as camadas inferiores visando o suporte adequado das cargas provenientes do tráfego de veículos.

As orientações normativas para especificação de peças de concreto para pavimentação são definidas pela ABNT (2013). Esta apresenta especificações e métodos de ensaio para peças de concreto para pavimentação, apontando as características que as peças de concreto para pavimentação devem possuir, incluindo dimensões, resistência à compressão e abrasão. Segundo a norma, é essencial que as peças tenham uniformidade para garantir a qualidade e durabilidade da pavimentação. Bezerra e Oliveira (2023) ressaltam a importância da resistência à compressão, indicando que este é um dos principais critérios para a escolha de materiais em construção civil, pois determina a capacidade de carga do material. Enfatiza-se a necessidade de uma inspeção rigorosa para garantir que as peças estejam de acordo com as especificações antes de serem utilizadas na pavimentação, e executadas conforme norma descrita no subitem a seguir.

Por sua vez, as orientações normativas para execução de pavimento intertravado com peças de concreto são definidas pela ABNT (2011). Essa norma apresenta especificações para execução de pavimento intertravado com peças de concreto, incluindo a preparação do subleito, o assentamento dos blocos e as práticas de controle de qualidade durante a execução. Cruz (2003) destaca que uma execução correta é fundamental para evitar defeitos futuros, como desníveis e irregularidades que podem comprometer a integridade estrutural do pavimento. Bezerra; Bezerra e Oliveira (2021) complementam essa informação associando a execução adequada com a durabilidade e a redução de custos de manutenção ao longo do tempo.

Além disso, ainda conforme Bezerra; Bezerra e Oliveira (2021), no sentido da execução adequada, algumas etapas construtivas são feitas de forma incorreta por ideias errôneas ou desconhecimento do processo. Uma dessas ações é a compactação da camada de assentamento, a qual é muitas vezes realizada por se considerar que esse procedimento aumentará a resistência do pavimento, quando, na verdade, ela pode reduzir a eficiência do intertravamento ao impedir que os blocos assentem na areia pela redução dos vazios.

Etapas do Processo de Investigação

Após a etapa de pesquisa bibliográfica, seguiu-se o acompanhamento da execução do pavimento, objeto de estudo desta pesquisa, onde realizou-se visitas periódicas, de setembro a dezembro de 2023, para analisar e registrar o processo construtivo. Durante essas visitas, foram coletados dados qualitativos sobre os métodos utilizados, a conformidade com as normas e a eficácia das soluções



DOI: 10.29327/1430212.49-102

CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADOS EM PAVIMENTAÇÃO DE VIA URBANA EM CIDADE NO INTERIOR DO CEARÁ

técnicas adotadas no local. Salienta-se que, para auxiliar o processo de análise e avaliação sistemática de cada etapa do processo de construção, utilizou-se um *checklist* desenvolvido a partir das diretrizes da ABCP e normas aplicáveis. Essa ferramenta foi essencial para assegurar que todos os aspectos críticos da execução fossem examinados e documentados de maneira objetiva. A Tabela 1 apresenta o modelo de *checklist* utilizado.

Tabela 1. *Checklist* dos serviços de pavimentação com blocos de concreto intertravados (Adaptado de ABCP, 2022)

Etapa	Critério	Avaliação	
		Liberada	Reprovada
SUBLEITO	Compactação, limpeza e ter caimentos prontos		
	CBR > 2% - verificar laudo de ensaio		
SUB-BASE E BASE	Compactação conforme indicado em projeto		
CONTENÇÃO	Cotas de níveis e alinhamentos conforme projeto		
	Executadas antes da camada de revestimento		
CAMADA DE ASSENTAMENTO	Espessura obedece ao projeto (3 a 7) cm e não foi compactada		
REVESTIMENTO	Peças assentadas com a face para cima do lado correto		
	Juntas alinhadas, uniformemente distribuídas e espessura conforme projeto (2 a 5) mm		
	Arremates bem definidos (pedaços maiores de 2,5 cm)		
REJUNTAMENTO	Preenchimento total das juntas		
	Substituição das peças eventualmente quebradas durante a compactação		
LIBERAÇÃO PARA O TRÁFEGO	Verificar caimentos		
	Verificação da superfície com régua de 3 m: desníveis inferiores a 10 mm		
CONTROLE TÉCNOLÓGICO	Verificação da planilha de controle de recebimento e aceitação		

Posteriormente, procedeu-se com uma análise crítica das informações coletadas, confrontando-as com o embasamento teórico para identificar desvios, inovações ou confirmações das práticas observadas. Esta análise auxiliou na compreensão das interações entre as variáveis estudadas e suas implicações na qualidade final do pavimento. Para uma representação visual do processo metodológico adotado, assim como para facilitar a compreensão e replicação do estudo, segue um fluxograma das etapas exposto na Figura 1.

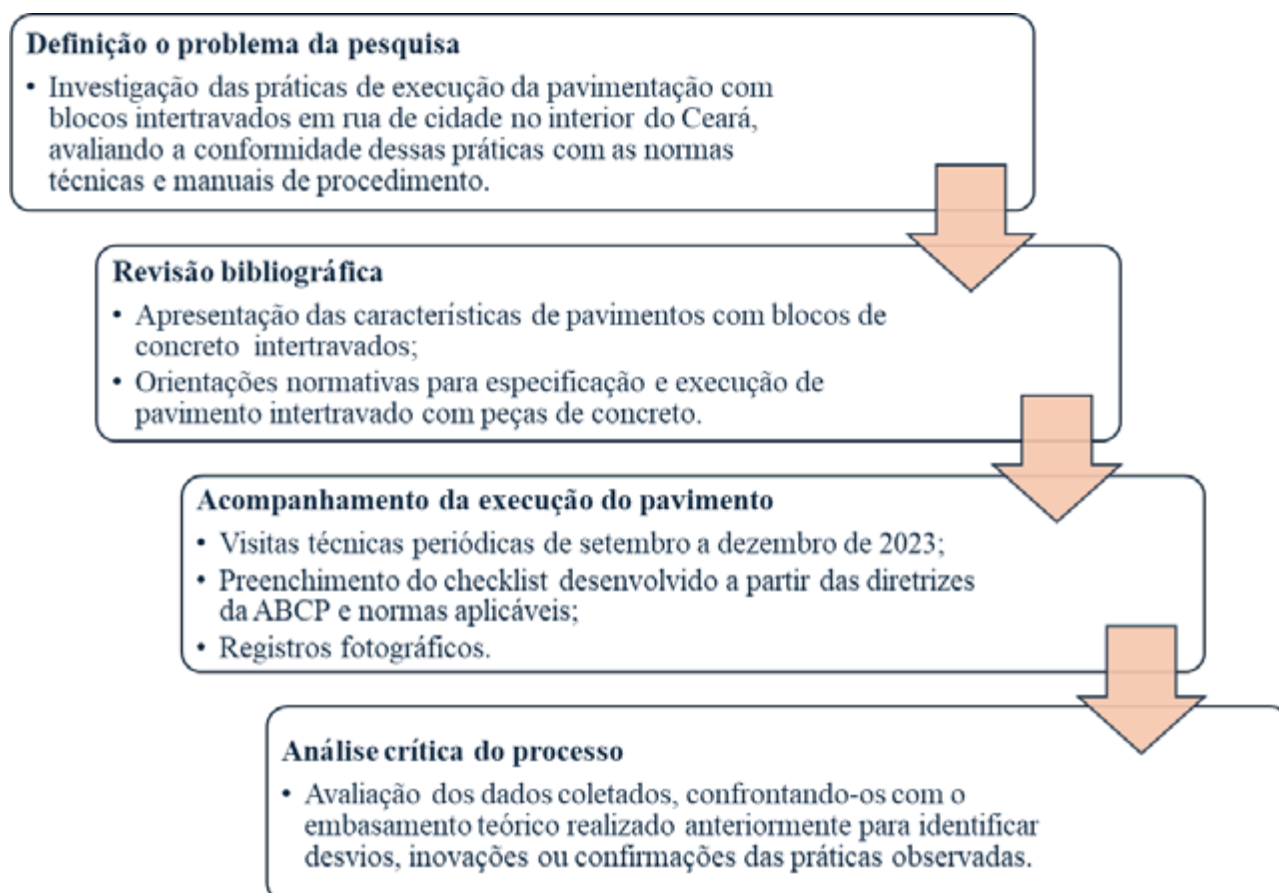


Figura 1. Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa (AUTORES, 2024)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Descrição do objeto de estudo: rua em cidade do interior do Ceará

O objeto deste estudo é uma via pública localizada em uma cidade do interior do Ceará. A rua possui uma extensão total de 1.216 m, com larguras variáveis que oscilam entre 10,50 m e 17,35 m. O foco da análise foi um trecho específico de 220 m, onde foi observada a implementação de pavimentação com blocos de concreto intertravados. Esse trecho é caracterizado por uma pista de mão dupla, contendo duas faixas de tráfego que permitem o fluxo de veículos em sentidos opostos.

Para a pavimentação, foram utilizados blocos de concreto do tipo 16 faces, que possuem uma espessura de 6 cm e são de cor uniforme. A escolha dessa tipologia de bloco visa a uniformidade visual e funcional, sem a integração de sinalização por diferenciação de cores nos blocos, focando na simplicidade e eficácia estrutural. A implementação neste trecho foi acompanhada para avaliar a conformidade com as técnicas e normas estabelecidas para pavimentos intertravados, considerando tanto a execução prática quanto as implicações para a mobilidade urbana na região. A Figura 2 mostra parte do trecho (a) antes e (b) após o serviço de pavimentação.



DOI: [10.29327/1430212.49-102](https://doi.org/10.29327/1430212.49-102)

CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADOS EM PAVIMENTAÇÃO DE VIA URBANA EM CIDADE NO INTERIOR DO CEARÁ



(a) Trecho antes do serviço de pavimentação com blocos de concreto intertravados



(b) Trecho após o serviço de pavimentação com blocos de concreto intertravados

Figura 2. Trecho pavimentado objeto de estudo do presente trabalho (GOOGLE, 2024)

Análise Técnica dos Materiais Utilizados na Obra

Esta análise iniciou pela avaliação das areias de assentamento e rejuntamento. Documentos do projeto indicaram que os ensaios de granulometria, essenciais para confirmar a adequação dessas areias, não foram executados. A ausência desses testes suscita preocupações quanto à adequação do material para a pavimentação, visto que a granulometria correta é fundamental para assegurar a aderência entre os blocos e as camadas e uma drenagem eficiente.

A falta de ensaios pode levar a diversos problemas, incluindo uma drenagem insuficiente e a falta de aderência necessária entre as camadas, o que pode resultar na necessidade de realizar reparos prematuros no pavimento. Por outro lado, os ensaios de resistência à compressão dos blocos de concreto foram realizados, mostrando que os blocos possuem uma resistência média à compressão de 35 MPa e uma absorção de água de 6%, segundo as especificações da ABNT (2013). Esses resultados confirmam que os blocos são adequados para o tráfego de pedestres e veículos leves.

No entanto, é importante enfatizar a necessidade de realizar ensaios em todos os materiais utilizados, não apenas nos blocos de concreto. Garantir que todos os componentes atendam às



especificações antes de sua utilização é essencial para a qualidade e a durabilidade do pavimento, minimizando manutenções prematuras e garantindo a segurança dos usuários.

Análise Técnica da Entrega e Armazenamento do Material

A análise da entrega e do armazenamento dos materiais revelou que o processo estava parcialmente alinhado às recomendações técnicas. Em relação à areia, a prática adotada de recebê-la por caminhões basculantes e armazená-la ao ar livre levantou preocupações sobre a preservação de suas propriedades. A exposição da areia a intempéries como chuva, vento e sol pode alterar suas características e torná-la menos adequada para a construção. Para mitigar esses riscos, recomenda-se armazenar a areia em locais cobertos ou protegê-la com lonas, garantindo a manutenção de suas propriedades essenciais.

Quanto aos blocos de concreto pré-moldados, embora tenham sido entregues e armazenados corretamente sobre paletes de madeira conforme as diretrizes, observou-se que o armazenamento não foi consistentemente adequado ao longo de todo o trecho da obra. O empilhamento inadequado dos blocos pode resultar em danos como rachaduras e deformações, comprometendo a qualidade do material antes mesmo de sua utilização. Para evitar tais problemas, os blocos devem ser armazenados de maneira organizada e cuidadosa, com atenção especial para evitar o contato direto com o solo e entre os blocos, minimizando assim os riscos de danos.

Essas observações destacam a importância de seguir rigorosamente as práticas recomendadas para o armazenamento e a manipulação de materiais, assegurando que tanto a areia quanto os blocos de concreto intertravados mantenham sua integridade até o momento de sua utilização na obra. A Figura 3 mostra o armazenamento desses materiais.



Figura 3. Armazenamento da areia e dos blocos (AUTORES, 2024)

Análise Técnica do Assentamento das Contenções Laterais

As contenções laterais definidas no projeto foram guias (meio fio) de concreto pré-fabricado nas dimensões de 100 x 15 x 13 x 20 (comprimento x base inferior x base superior x altura) centímetros. O assentamento dessas guias foi realizado manualmente. Elas foram assentadas antes da compactação da sub-base e do assentamento dos blocos, como indicado na bibliografia, contribuindo para a qualidade do pavimento. O fato das guias estarem de acordo com as



DOI: [10.29327/1430212.49-102](https://doi.org/10.29327/1430212.49-102)

CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADOS EM PAVIMENTAÇÃO DE VIA URBANA EM CIDADE NO INTERIOR DO CEARÁ

especificações da ABNT (2011), e terem sido instaladas no início da obra é importante, pois ajuda a garantir que o pavimento seja construído de acordo com os padrões recomendados, na qual essas guias desempenham um papel importante na geometria do pavimento e na contenção lateral do material, contribuindo para a durabilidade e a segurança da estrutura.

Análise Técnica da Execução das Camadas de Sub-base, Base e Assentamento

Durante a construção, observou-se que as camadas de sub-base, base e assentamento não foram realizadas conforme ABNT (2011 e 2013). Observou-se a implementação de uma única camada de areia de 25 cm de espessura, cuja granulometria não foi especificada anteriormente. Esta abordagem inadequada na preparação das camadas pode afetar significativamente o desempenho do pavimento, potencialmente levando a problemas como afundamentos, ondulações e desníveis. Além disso, a insuficiência na drenagem pode causar acumulação de água, e a falta de uma base e sub-base apropriadas pode acelerar o desgaste do pavimento, resultando em rachaduras e quebras prematuras dos blocos de concreto.

A camada de areia foi aplicada diretamente sobre o subleito natural, seguida por espalhamento, nivelamento e compactação com um compactador tipo placa vibratória. No entanto, essa prática não substitui as funções essenciais das camadas de sub-base e base, que são fundamentais para a distribuição de cargas e controle da umidade. Adicionalmente, a camada de assentamento foi compactada, uma prática inadequada que compromete a principal função dessa areia, que é garantir uma superfície regular para a colocação dos blocos, afetando o intertravamento necessário para a estabilidade do pavimento.

Análise Técnica do Assentamento dos Blocos de Concreto Intertravados

Os testes realizados mostraram que a resistência dos blocos de concreto está em conformidade com a ABNT (2013), indicando sua adequação para o uso previsto. Durante a obra, o transporte desses blocos foi feito com carrinhos de mão, uma prática alinhada com as diretrizes recomendadas. No entanto, é essencial que os trabalhadores manuseiem os blocos com cuidado para evitar danos e consequentes desperdícios e custos adicionais.

Observou-se também que após a chegada no local da obra, os blocos foram submetidos a uma inspeção visual, conforme estipulado por ABNT (2011 e 2013), e pela ABCP (2022). Os trabalhadores foram instruídos a, caso identifiquem blocos danificados, separarem o lote defeituoso para que esses blocos sejam devolvidos ao fornecedor e substituídos por outros blocos de qualidade adequada. Observou-se em campo alguns blocos com defeitos, na qual uma parcela dos blocos apresentou segregação do concreto, sendo assim de acordo com a ABNT (2011) e a ABCP (2022), esses blocos deverão ser devolvidos por completo. A Figura 4 mostra algumas peças defeituosas identificadas na análise de campo.



Mariana de Araújo Leite, Silvio Rocha Ferreira Neto, Lucas Cavalcante de Almeida, José Wémenson Rabelo Chaves & Francisco Heber Lacerda de Oliveira



Figura 4. Blocos defeituosos (AUTORES, 2024)

O assentamento dos blocos foi realizado manualmente, seguindo o padrão de espinha de peixe e utilizando espaçadores de juntas para facilitar a colocação. É importante notar que, ocasionalmente, quantidades excessivas de blocos foram transportadas e não usadas imediatamente, ficando expostas ao ar livre. A Figura 5 exemplifica o transporte e assentamento dos blocos.



Figura 5. Transporte e assentamento dos blocos (AUTORES, 2024)

Análise Técnica dos Ajustes e Arremates

Após a instalação das peças, os cortes nos blocos foram efetuados, com o auxílio de guilhotinas, a fim de adaptá-los às contenções. Além disso, foi executada uma sarjeta de concreto, segundo as especificações de projeto, para preencher os espaços entre as contenções e os blocos recém-cortados e realizar a drenagem do pavimento. Apesar da sarjeta não ser elemento obrigatório na execução de pavimentos intertravados, as práticas observadas estão em conformidade com as normas e manuais mencionados na bibliografia, assegurando assim a integração correta dos blocos na obra.

Análise Técnica da Execução da Camada de Rejuntamento e da Compactação

Na execução deste pavimento, optou-se por utilizar pó de pedra, onde a escolha deste material ocorreu pela facilidade de obtenção do material e a viabilidade econômica que ele traz. No entanto, a utilização desse material deve obedecer a granulometria exigida pela ABNT (2011). Além disso, optou-se por esse material por uma ideia errônea de que o pó de pedra é mais permeável e, por isso,



DOI: [10.29327/1430212.49-102](https://doi.org/10.29327/1430212.49-102)

CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADOS EM PAVIMENTAÇÃO DE VIA URBANA EM CIDADE NO INTERIOR DO CEARÁ

poderia ajudar na questão da drenagem. Contudo, é importante ressaltar que o pavimento com blocos de concreto intertravados não é um pavimento permeável, sendo considerado dessa forma somente quando os blocos são executados para tal finalidade.

A etapa de varrição e espalhamento foi conduzida de acordo com as normas descritas, onde a varrição foi realizada com vassouras. Não houve excesso, nem falta de varrição, garantindo assim que as juntas fossem preenchidas adequadamente. Além disso, uma técnica não indicada na bibliografia, foi executada nesta fase, onde, com o auxílio de caminhões-pipa, água foi jogada em toda a extensão do trecho sobre o qual o material de rejuntamento havia sido varrido. Foi realizada essa técnica tem como objetivo assegurar que o pó de pedra se fixe entre as juntas dos blocos o que, contudo, não é confirmado pela literatura.

Após a etapa de execução do material de rejuntamento, foi realizada apenas a compactação final do trecho, utilizando um compactador de solo, do tipo placa vibratória. No entanto, é importante observar que não foram realizadas as duas compactações dos blocos de concreto de maneira correta. Após o assentamento dos blocos e antes da execução do material de rejuntamento, é necessário executar uma compactação inicial para nivelar a superfície da camada de blocos, e para que a areia que está na camada abaixo preencha parcialmente as juntas de baixo para cima.

Sem a execução dessa compactação inicial, os blocos poderão perder a sua capacidade de travamento, e, é nessa etapa de compactação inicial que é possível remover os blocos menos resistentes que acabaram sendo danificados. Foi possível verificar *in loco* que um bloco, após a compactação final, não suportou a carga, apresentando fissuras e necessitando ser substituído. A Figura 6 apresenta o processo de umedecimento do pavimento utilizando caminhão pipa e a posterior compactação.



Figura 6. Umedecimento e compactação final do trecho (AUTORES, 2024)

Análise Técnica da Inspeção Final e preenchimento do *Checklist* do Trecho Analisado

A inspeção final não foi suficientemente rigorosa para detectar possíveis desníveis, apesar de nenhum defeito visível ter sido observado ao término das observações de campo. Contudo, uma parte do pavimento, no local onde havia as contenções provisórias por uma paralisação momentânea, apresentou deficiências, onde foram observadas falhas no preenchimento das juntas e



na execução das contenções. Estes problemas exigirão correções significativas quando a obra for retomada, aumentando os custos e o cronograma de trabalho. A Figura 7 mostra tais falhas.



Figura 7. Falhas observadas na inspeção final (AUTORES, 2024)

No processo de inspeção final, o *checklist* da obra foi preenchido, utilizando-se dados coletados em campo, informações fornecidas pela empresa, pelo engenheiro responsável, e pela Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Infraestrutura do Município. As avaliações nas colunas indicam se as etapas estavam 'Liberadas' ou 'Reprovadas' de acordo com ABNT (2011 e 2013) e ABCP (2022). Esse documento ajudou a identificar claramente quais etapas estavam em conformidade com as diretrizes e quais necessitavam de ajustes. A Tabela 2 apresenta o *checklist* preenchido.

Tabela 2. *Checklist* do preenchido (AUTORES, 2024)

Etapa	Critério	Avaliação	
		Liberada	Reprovada
SUBLEITO	Compactação, limpeza e ter caimentos prontos	X	
	CBR > 2% - verificar laudo de ensaio		X
SUB-BASE E BASE	Compactação conforme indicado em projeto	X	
CONTENÇÃO	Cotas de níveis e alinhamentos conforme projeto	X	
	Executadas antes da camada de revestimento	X	
CAMADA DE ASSENTAMENTO	Espessura obedece ao projeto (3 a 7) cm e não foi compactada		X
REVESTIMENTO	Peças assentadas com a face para cima do lado correto	X	
	Juntas alinhadas, uniformemente distribuídas e espessura conforme projeto (2 a 5) mm	X	
	Arremates bem definidos (pedaços maiores de 2,5 cm)	X	
REJUNTAMENTO	Preenchimento total das juntas	X	
	Substituição das peças eventualmente quebradas durante a compactação	X	
LIBERAÇÃO PARA O TRÁFEGO	Verificar caimentos		X
	Verificação da superfície com régua de 3 m: desníveis inferiores a 10 mm		X
CONTROLE TECNOLÓGICO	Verificação da planilha de controle de recebimento e aceitação		X



DOI: [10.29327/1430212.49-102](https://doi.org/10.29327/1430212.49-102)

CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADOS EM PAVIMENTAÇÃO DE VIA URBANA EM CIDADE NO INTERIOR DO CEARÁ

CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou a importância de seguir rigorosamente às normas e diretrizes técnicas no processo de construção de pavimentos intertravados. As análises realizadas revelaram áreas de não conformidade que impactaram a qualidade e a durabilidade do pavimento, particularmente no que diz respeito à preparação das camadas de sub-base, base e assentamento, bem como na escolha e aplicação dos materiais de rejuntamento.

Foi evidenciado que o desvio das práticas recomendadas, como a compactação inadequada das camadas e o uso de materiais de rejuntamento não especificados, pode levar a falhas estruturais significativas. Essas falhas não apenas comprometem a integridade do pavimento, mas também aumentam os custos de manutenção e reparo a longo prazo. Por conseguinte, recomenda-se uma revisão das práticas de construção e a adesão aos procedimentos estabelecidos. Todas as fases da construção devem ser planejadas e executadas conforme as especificações técnicas para evitar problemas futuros.

Este estudo evidencia a necessidade de inspeções rigorosas e contínuas ao longo do processo de construção para garantir que todas as etapas, desde o assentamento inicial dos blocos até a inspeção final do pavimento, sejam realizadas com qualidade. A implementação de melhorias baseadas nas observações deste trabalho pode levar a uma maior eficiência e durabilidade dos pavimentos intertravados, beneficiando assim a infraestrutura urbana como um todo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP. Manual de Pavimento Intertravado. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2010.
- ABCP. Manual de Desempenho de Pavimento Intertravado. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2022.
- ABNT, N. B. R. 15953. Pavimento Intertravado com Peças de Concreto – Execução. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.
- ABNT, N. B. R. 9781. Peças de Concreto para Pavimentação – Especificação e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.
- Bezerra, F. S. C., Bezerra, F. A. C., & Oliveira, F. H. L. A influência da camada de base no dimensionamento de pavimentos intertravados com tráfego leve. 23º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária & 46ª Reunião Anual de Pavimentação, 2021. Brasília, Distrito Federal.
- Bezerra, F. S. C., & Oliveira, F. H. L. Impacto dos defeitos na vida útil de pavimentos intertravados. 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária & 48ª Reunião Anual de Pavimentação, 2023. Foz do Iguaçu - Paraná.
- Cruz, L.O.M. Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento. Universidade do Rio de Janeiro, 2003.
- Google. 2024. Ceará. [s.l.]: Google Maps. <https://maps.app.goo.gl/QbN48sZYdRGul5N6>.



INOVADORA VERSÃO DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO IMPREGNADO COM ASFALTO COMO CAMADA INTERMEDIÁRIA IMPERMEÁVEL E REDUTORA DA REFLEXÃO DAS TRINCAS

Guillermo Montestruque¹; Gustavo Castro da Silva¹; João Marcos Almeida Fernandes¹; Joaquim Rodrigues Gomes Neto¹ & Breno Richard da Silva¹.

RESUMO

Devido às cargas do Tráfego e temperatura as trincas existentes no pavimento antigo se propagam para a nova camada de recapeamento asfáltico pelo fenômeno de reflexão de trincas. Montestruque (2002) afirma que geotêxtil não tecido impregnado com material asfáltico atua como uma camada intermediária de alívio de tensões (SAMI - Stress Absorbing Membrane Interlayer) retardando o fenômeno de reflexão de trincas. Além deste benefício, também constituiu-se uma camada impermeabilizante quando seja impregnado com asfalto corretamente. A Camada Porosa de Atrito (CPA) foi desenvolvida, para melhorar a serventia do pavimento e a segurança viária, a sua macrotextura proporciona drenabilidade e aumento da aderência entre pneu e pavimento. O requisito para aplicar o CPA é que a camada subjacente seja impermeável, neste contexto, a CPA não poderia ser usada sobre um pavimento trincado diretamente já que a água poderia infiltrar através das trincas para as camadas subjacentes causando uma rápida deterioração. O geotêxtil não tecido impregnado com asfalto aplicado entre o pavimento antigo e a CPA, apresenta-se como uma excelente solução para este problema, garantindo-se sua impermeabilidade e com declividade adequada a água direciona-se para os drenos laterais. Este trabalho tem como objetivo principal determinar a taxa de impregnação com emulsão asfáltica que oferece sua impermeabilização e melhor aderência entre as camadas asfálticas verificada através do ensaio de cisalhamento direto. Para este estudo foram utilizados geotêxteis não tecidos com gramaturas de 150 g/m² e 170 g/m², concluiu-se que e as taxas de impregnação de 1,3 l/m² e 1,4 l/m² são adequadas respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Recapeamento Asfáltico; Geotêxtil não tecido; Camada Porosa de Atrito.

ABSTRACT

Due to traffic loads and temperature, cracks existing in the old pavement propagate to the new asphalt overlay through the phenomenon of reflective cracking. Montestruque (2002) states that nonwoven geotextile impregnated with asphalt acts as a stress-relieving intermediate layer (SAMI - Stress Absorbing Membrane Interlayer), delaying the reflective crack phenomenon. In addition to this benefit, it also constitutes a waterproofing layer when impregnated with asphalt correctly. The Porous Friction Course (PFC) was developed to improve the pavement's usefulness and road safety, its macrotexture provides drainage and increased adhesion between tire and pavement surfacing. The requirement to apply PFC is that underlying layer must be impermeable, in this context, PFC could not be used directly over a cracked pavement because the water could infiltrate through the cracks into the underlying layers causing the rapid deterioration. The nonwoven geotextile impregnated with asphalt applied between the old pavement surfacing and the PFC presents itself as an excellent solution to this problem, guaranteeing its impermeability and with adequate slope, the water will be directed to the lateral drains. The main objective of this work is to determine the impregnation rate with asphalt emulsion that offers waterproofing and better adhesion between the asphalt layers verified through the direct shear test. For this study, nonwoven geotextiles with weights of 150 g/m² and 170 g/m² were used, it was concluded that the impregnation rates of 1.3 l/m² and 1.4 l/m² are appropriate respectively.

KEY WORDS: Asphalt Overlay; Nonwoven Geotextile; Porous Friction Course.

¹ Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP) - Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo (FEAU).
montestruque@infratrans.com.br; gustavocastro@outlook.com; jmfalmeida09@gmail.com;
joaquimrodrigues238@gmail.com; brennors11@gmail.com.



DOI: [10.29327/1430212.49-105](https://doi.org/10.29327/1430212.49-105)

INOVADORA VERSÃO DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO IMPREGNADO COM ASFALTO COMO CAMADA INTERMEDIÁRIA IMPERMEÁVEL E REDUTORA DA REFLEXÃO DAS TRINCAS

1 INTRODUÇÃO

O trincamento em pavimentos asfálticos é um grande problema, já que reduz a vida útil do revestimento asfáltico. O início do trincamento na mistura asfáltica deve-se principalmente às cargas do tráfego, os ciclos de carga e descarga provocam a fadiga da mistura asfáltica. A temperatura também influencia, geralmente onde existem variações térmicas significativas. A trinca por fadiga é iniciada onde existe uma maior tensão e deformação de tração na camada de revestimento asfáltico, pode ter seu início de cima para abaixo (Top-down cracking) ou de abaixo para cima (bottom-up cracking) de forma mais frequente. Uma vez formada a trinca, sua propagação deve-se à concentração de tensões entorno da ponta dela, por causa do tráfego ou por temperatura através do mecanismo de fratura e não mais por o mecanismo de fadiga. A continuidade da superfície é destruída, a resistência estrutural do pavimento decresce, podendo a água de chuva ingressar na estrutura, tornando-se um forte promotor da deterioração subsequente.

A restauração de pavimentos asfálticos normalmente envolve uma sobreposição de uma nova camada asfáltica ou uma fresagem parcial seguida de recomposição, sobre o pavimento trincado. A fresagem parcial não elimina as trincas subjacentes do pavimento existente e a espessura do recapeamento pode depender da condição do pavimento existente, do tráfego previsto e dos recursos financeiros disponíveis.

As cargas de tráfego causam movimentos verticais e horizontais entre as paredes das trincas existentes. Ao se colocar uma nova camada asfáltica sobre a trinca existente, a porção de material acima da região da trinca vai reduzindo sua rigidez, devido à concentração de tensões de tração e de cisalhamento atuantes, nesta região se dará origem a sua propagação na nova camada asfáltica de recapeamento. Este processo de perda de rigidez continua por fratura é conhecido como fenômeno de reflexão de trincas. Assim, ocorrendo a reflexão de trincas prematuramente, dentro de pouco tempo a nova camada poderá estar com os mesmos problemas da camada original.

A principal característica da Camada Porosa de Atrito (CPA) é a sua drenabilidade e macrotextura que permite aumento da aderência entre pneu e pavimento. Esta camada não poderia ser usada sobre um pavimento trincado diretamente já que a água de chuva infiltraria através das trincas para as camadas inferiores do pavimento causando uma rápida deterioração da estrutura do pavimento (Figura 1). A impregnação dos geotêxteis não tecidos por emulsão asfáltica permite com que obtenham uma característica de impermeabilização quando utilizada a taxa correta. O geotêxtil impregnado com emulsão poderá ser utilizado como camada intermediária, aplicado sobre o revestimento do pavimento existente trincado para posteriormente aplicação da CPA de recapeamento. A CPA, por conter altos índices de vazios, permite com que a água das chuvas percorra por dentro desta camada chegando até a posição do geotêxtil impregnado, como o geotêxtil impregnado tem a característica de ser impermeável, essa água é direcionada horizontalmente para os drenos laterais, evitando o acúmulo de água no revestimento asfáltico e conseqüentemente elimina o fenômeno de aquaplanagem dos veículos e espriamento da água.

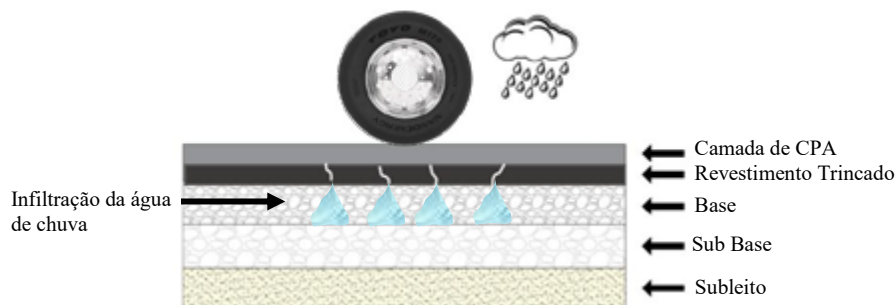


Figura 1 - Infiltração de água de chuva através da CPA e pelas trincas existentes.

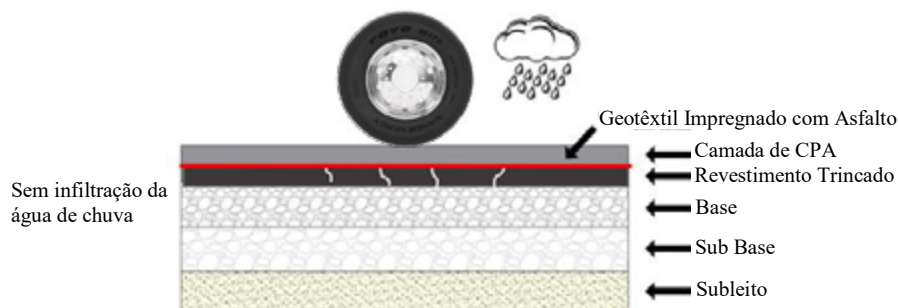


Figura 2 - Impermeabilização da estrutura do pavimento com geotêxtil impregnado.

2 MATERIAIS

O presente item descreve os materiais, os métodos e os equipamentos empregados no desenvolvimento da pesquisa.

2.1 O Geossintético Geotêxtil

O geotêxtil é um produto geossintético, polimérico, industrializado, se apresenta na forma de uma manta contínua composta por fibras ou filamentos que podem ser tecidos, não tecidos ou tricotados. Estas mantas são flexíveis e permeáveis, sendo aplicadas em obras de engenharia civil com função de separação, proteção, filtração, drenagem, reforço e controle de erosões. De acordo com a ABINT (2001), os geotêxteis são divididos em dois grandes grupos, baseados no processo de fabricação, sendo os tecidos e não tecidos. Para esta pesquisa foram utilizados geotêxteis não tecidos de fibras curtas de poliéster, agulhadas e consolidadas termicamente por calandragem com gramaturas de 150 g/m² e 170 g/m².

2.2 Emulsão Asfáltica

Emulsões asfálticas, são misturas onde o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) encontra-se disperso em uma fase aquosa. As emulsões asfálticas surgiram como alternativa para que o asfalto fosse aplicado a frio, pois, na produção de misturas asfálticas a quente, é necessário que os componentes a serem misturados ao CAP estejam quentes, acarretando maiores custos com equipamentos e riscos aos operários durante o manuseio. Estas emulsões, após a aplicação, perdem a água, resultando na solidificação do asfalto (Bauer, 1999; ABEDA, 2001). Para esta pesquisa foram utilizadas as emulsões tipo RR-1C.



DOI: 10.29327/1430212.49-105

INOVADORA VERSÃO DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO IMPREGNADO COM ASFALTO COMO CAMADA INTERMEDIÁRIA IMPERMEÁVEL E REDUTORA DA REFLEXÃO DAS TRINCAS

2.3 Camada Porosa de Atrito

Concreto asfáltico poroso com ligante asfáltico modificado por polímero é uma mistura executada a quente, em usina apropriada, com características específicas. É composto de agregado graduado, cimento asfáltico modificado por polímero e, se necessário, material de enchimento, filer, e melhorador de adesividade, sendo espalhada e compactada a quente. O concreto asfáltico poroso com ligante modificado por polímero deve ser empregado como camada sobrejacente ao revestimento, com a função de drenar a água superficial evitando a aquaplanagem.

A CPA, por apresentar um grande volume de vazios, possui propriedades drenantes, portanto é utilizada para diminuir as taxas de aquaplanagem no revestimento, e somado a isso, ela reduz os ruídos gerados pelos veículos que passam por ela. A CPA permite que a água que é depositada nela seja escoada e encaminhada para drenos ou valetas laterais que são construídas para captação das águas pluviais, ela pode ser muito útil nos pavimentos em épocas de enchentes e chuvas torrenciais, pois evita que uma lâmina d'água seja formada, reduzindo a possibilidade de acidentes ao longo do trecho. O pavimento, quando exposto a um acúmulo excessivo de água, pode ter a sua vida útil reduzida devido à perda da capacidade de suporte das camadas subjacentes, ocasionando deformações excessivas na sua estrutura e consequentemente o surgimento de trincas na superfície. A composição granulométrica utilizada nesta pesquisa é apresentada na Figura 3.

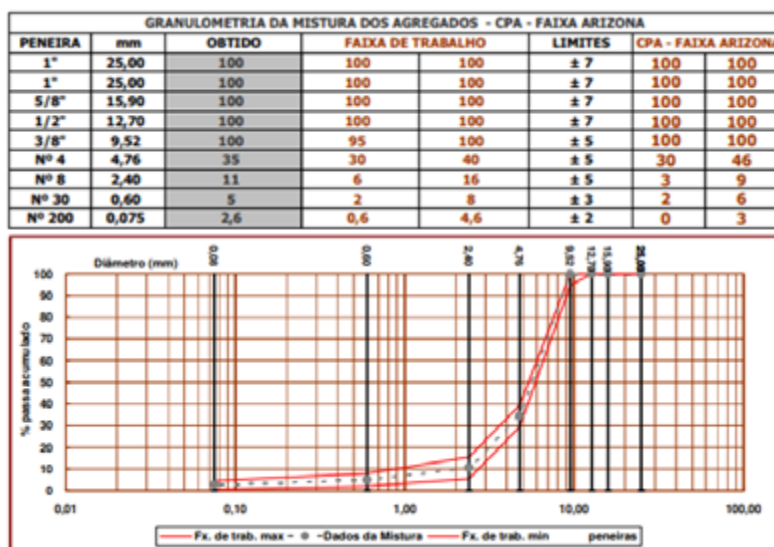


Figura 3 – Faixa Granulométrica dos agregados.

3 METODOLOGIA

3.1 Impregnações dos Geotêxteis

Uma parte primordial no processo é a impregnação do geotêxtil com o asfalto, pois é onde será determinada a taxa de emulsão necessária para obter a impermeabilização das amostras através do asfalto residual. Foram impregnadas um total de 102 amostras. O procedimento de impregnação dos geotêxteis não tecidos seguem os seguintes passos:

- 1º - Corte de mantas de geotêxtil não tecido nas dimensões de 290 mm x 210 mm (A4, Figura 4b);
- 2º - Pesagem do geotêxtil não tecido (Figura 4c);
- 3º - Pesagem da emulsão requerida;



Guillermo Montestruque,
Gustavo Castro da Silva, João Marcos Almeida Fernandes,
Joaquim Rodrigues Gomes Neto & Breno Richard da Silva

- 4° - Impregnação do geotêxtil não tecido com auxílio do rolo regulável (Figura 5a);
5° - Secagem do geotêxtil não tecido com o soprador de ar quente (Figura 5b);
6° - Pesagem do geotêxtil não tecido impregnado (Figura 5c).

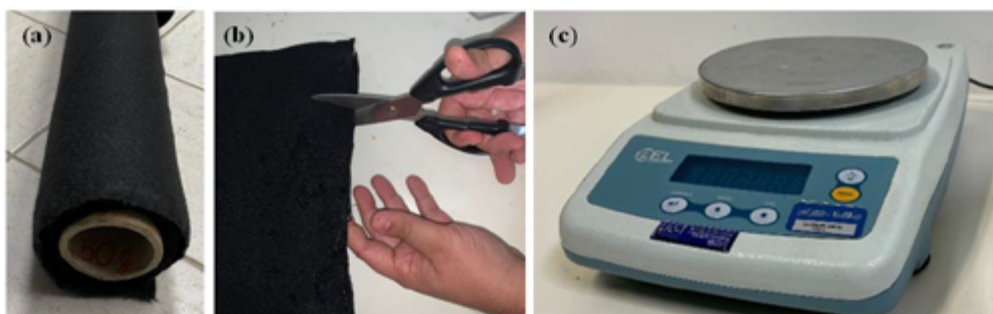


Figura 4 – (a) Bobina Geotêxtil (b) Corte do Geotêxtil (c) Balança de precisão utilizada.



Figura 5 – (a) Impregnação da emulsão com o geotêxtil; (b) Secagem do geotêxtil não tecido com o soprador de ar quente; (c) Pesagem do geotêxtil não tecido impregnado.

3.2 Ensaio de estanqueidade do geotêxtil impregnado com asfalto

O ensaio de estanqueidade tem a finalidade de verificar a impermeabilidade da amostra. Nesta etapa da pesquisa foram utilizados os seguintes equipamentos: Dessecador de vidro usado apenas como recipiente, pistola de PU, proveta graduada (Figura 6). A pistola de PU foi utilizada para vedação ao redor do geotêxtil impregnado para evitar possíveis infiltrações pelas laterais, o material PU foi escolhido por ser de fácil aplicação e ter uma boa aderência sobre a superfície.

Os geotêxteis já impregnados com a emulsão asfáltica, devidamente secos e com seus pesos aferidos, foram cortados no formato circular com diâmetro de 180 mm, mesmo tamanho do diâmetro interno do dessecador de vidro (Figura 7a). Posteriormente o geotêxtil impregnado foi colocado no interior do dessecador de vidro (Figura 7b). Com auxílio da pistola de PU, foi realizada a vedação apenas nas extremidades (Figura 7c). Após a secagem do PU foi vertido água no interior do dessecador de vidro (Figura 8a).

Os ensaios posteriores de estanqueidade foram realizados com a taxa de impregnação de 1,3 l/m² e 1,4 l/m² para as gramaturas de 150g e 170g por um período de 24 horas, todas as amostras com essa taxa de impregnação obtiveram êxito, não houve qualquer tipo de infiltração (Figura 9).



DOI: 10.29327/1430212.49-105

INOVADORA VERSÃO DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO IMPREGNADO COM ASFALTO COMO CAMADA INTERMEDIÁRIA IMPERMEÁVEL E REDUTORA DA REFLEXÃO DAS TRINCAS

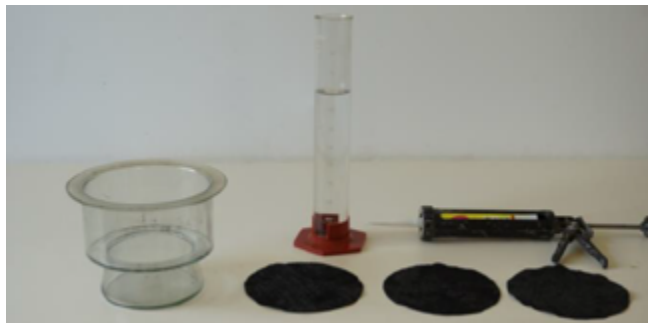


Figura 6 - Dessecador de vidro utilizado como recipiente, pistola de PU e proveta e geotêxteis impregnados.

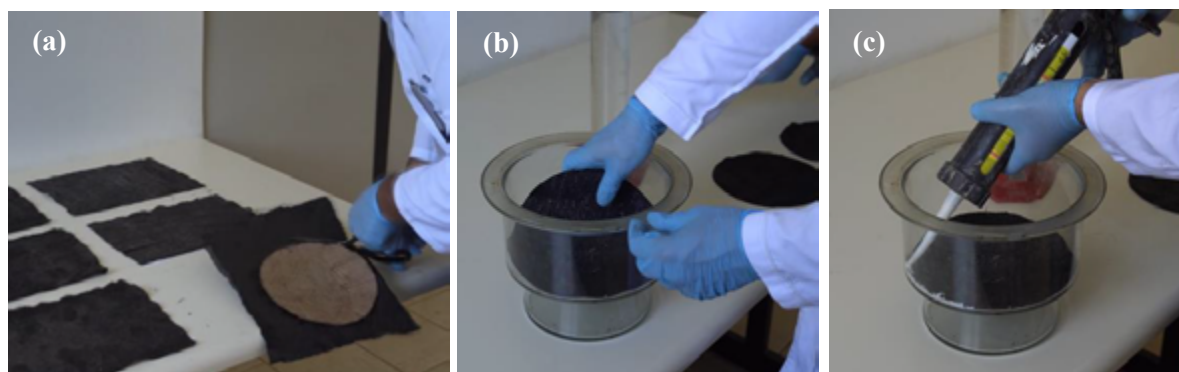


Figura 7 - (a) Corte circular dos geotêxteis impregnados; (b) Colocação do geotêxtil impregnado no interior do dessecador de vidro; (c) Aplicação do PU sobre o geotêxtil impregnado.

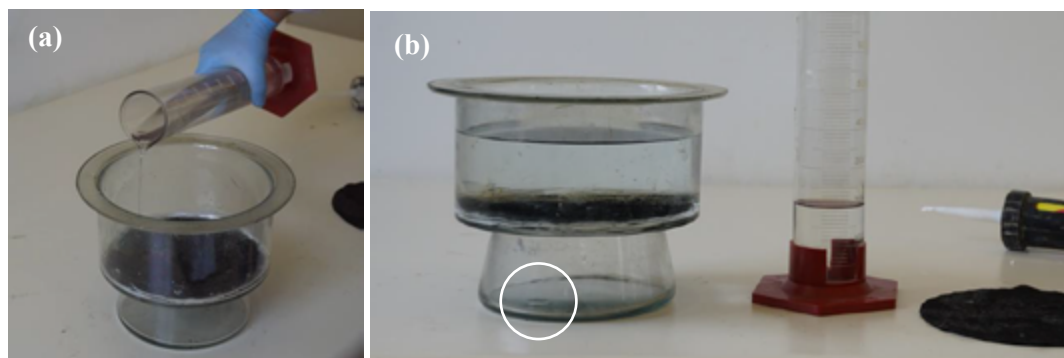


Figura 8 – (a) Vertendo água sobre o geotêxtil impregnado; (b) Infiltração de água no ensaio para a taxa de 1,2 l/m².

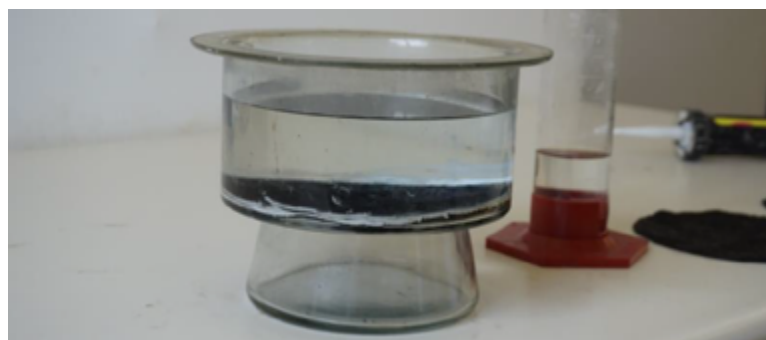


Figura 9 - Ensaio de estanqueidade para as taxas de 1,3 l/m² e 1,4 l/m² (sem infiltração de água).



3.3 Ensaio de estanqueidade do geotêxtil impregnado com asfalto em corpos de prova prismáticos de CPA

A taxa de emulsão escolhida após o ensaio de estanqueidade dos geotêxteis impregnados foi de 1,3 e 1,4 l/m², para a moldagem das vigas de concreto asfáltico em CPA. Foram recortados os geotêxteis de gramaturas de 150g e 170g com a dimensão de 500 mm x 280 mm, repetindo-se os procedimentos anteriores, iniciando pela pesagem da manta de geotêxtil sem a impregnação, impregnação, secagem e pesagem com impregnação.

A faixa granulométrica da mistura asfáltica foi apresentada na Figura 3. O processo de mistura dos corpos de provas foi realizado a uma temperatura de 150 °C (Figura 10). Foram moldados 04 corpos de prova de concreto asfáltico com as dimensões de 25 mm x 450 mm x 300 mm. Para a compactação da mistura asfáltica foi utilizado o compactador por amassamento do tipo PresBox do Centro de Pesquisa Rodoviário da concessionária RioSP (Figura 11a). A colocação da mistura asfáltica foi realizada por camadas, sendo a primeira camada uma fração da mistura asfáltica, como segunda camada intermediária foi colocada o geotêxtil impregnado com emulsão na gramatura de 150g/m², a terceira camada foi novamente a mistura asfáltica. O mesmo procedimento foi realizado para o geotêxtil de 170g/m². Imediatamente se procedeu ao processo de compactação. Finalizado o processo de compactação dos corpos de prova em concreto asfáltico e ejetada da forma prismática (Figura 11b).

Após o esfriamento dos corpos de prova em concreto asfáltico por 48 horas, se procedeu ao corte com serra disco utilizando o equipamento “Policorte”. A Figura 13a mostra o esquema de corte que foi adotado e a Figura 12 o equipamento utilizado. Como resultados do processo de corte dos 02 corpos de prova prismáticos se obtiveram 08 corpos de prova em vigas de CPA com dimensões de 380 mm x 75 mm x 75 mm (Figura 13b), resultando em 04 vigas sem geotêxtil, 02 vigas com geotêxtil de 150g/m² e 02 vigas com geotêxtil de 170g/m².



Figura 10 – Preparo da mistura asfáltica de CPA.



Figura 11 - Compactador de misturas asfálticas e corpo de prova prismático moldado.



DOI: 10.29327/1430212.49-105

INOVADORA VERSÃO DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO IMPREGNADO COM ASFALTO COMO CAMADA INTERMEDIÁRIA IMPERMEÁVEL E REDUTORA DA REFLEXÃO DAS TRINCAS



Figura 12 - Processo de corte dos corpos de prova na máquina de policorte.

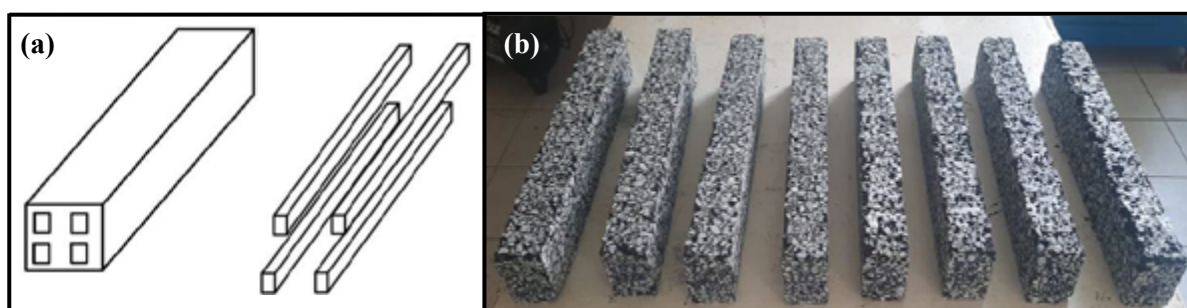


Figura 13 – (a) Esquema de corte; (b) Corpos de prova cortados com e sem geotêxtil impregnado.

3.4 Ensaio de estanqueidade no corpo de prova prismáticos sem e com o geotêxtil impregnado com asfalto

Para a realização de este ensaio foram projetados e fabricados em oficina especializada 02 recipientes em acrílico, um para o corpo de prova prismático sem geotêxtil e o outro para o corpo de prova prismático com geotêxtil impregnado. O recipiente tem a dimensão interna de 398 mm x 100 mm em acrílico, para assim, poder observar visualmente se irá infiltrar água através da camada porosa de atrito com e sem geotêxtil impregnado com asfalto. Em ambos os casos foi necessário realizar sua vedação, para esta finalidade foi utilizado a espuma “Tarucel” (Polietileno Expandido), e também PU para vedar as laterais do “Tarucel” de forma de garantir uma vedação total das laterais dos corpos de prova (Figura 14).

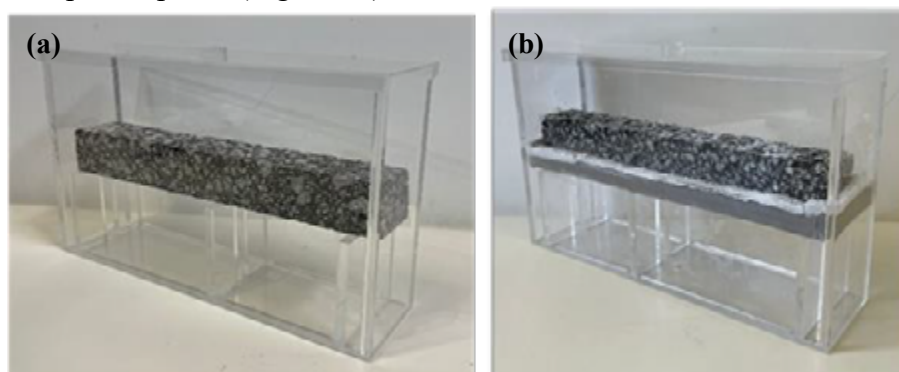


Figura 14 – (a) Corpo de prova em concreto asfáltico com e sem geotêxtil antes de sua vedação; (b) Vedação do recipiente de acrílico para o ensaio de estanqueidade.



Logo após a vedação completa, foi realizado o ensaio de estanqueidade dos corpos de prova de concreto asfáltico sem e com geotêxtil impregnado com asfalto. Foi observada nos corpos de prova prismática sem geotêxtil impregnado com asfalto que apenas foi vertida a água, sua infiltração foi imediata e em pouco tempo toda a água vertida sobre o corpo de prova prismático passa através do corpo de prova (Figura 15).



Figura 15 – Infiltração da água praticamente instantânea nos corpos de prova sem geotêxtil.

Para o caso dos corpos de prova com geotêxtil impregnado com asfalto, a grande dúvida inicial foi se ao lançar a mistura asfáltica a quente e posterior compactação, o geotêxtil impregnado pudesse perder sua impermeabilidade alcançada de forma individual por a perda do ligante asfáltico nos vazios da camada porosa de atrito, mas isto não ocorreu, o ensaio de estanqueidade dos corpos de provas com geotêxteis não tecidos impregnados com asfalto foi um sucesso, sua impermeabilidade se manteve (Figura 16).

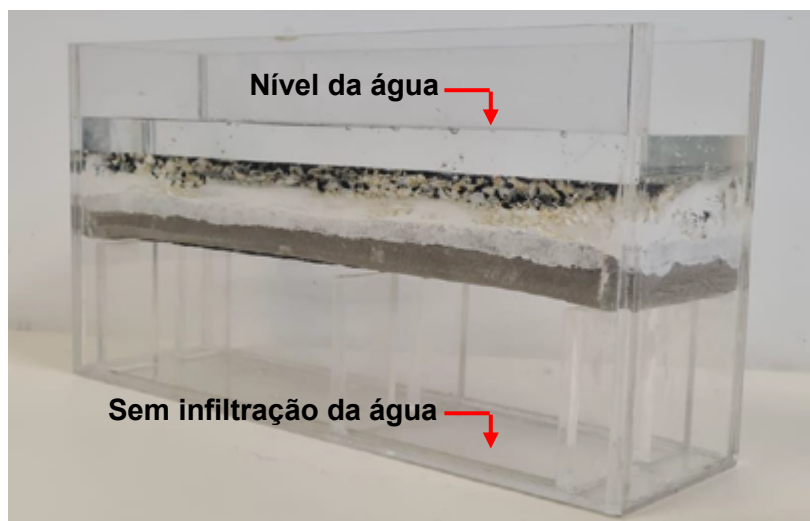


Figura 16 – Ensaio de estanqueidade do corpo de prova com geotêxtil impregnado com asfalto, sem presença de infiltração de água.



DOI: 10.29327/1430212.49-105

INOVADORA VERSÃO DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO IMPREGNADO COM ASFALTO COMO CAMADA INTERMEDIÁRIA IMPERMEÁVEL E REDUTORA DA REFLEXÃO DAS TRINCAS

3.5 Ensaio de aderência em corpos de prova cilíndrico sem e com o geotêxtil impregnado com asfalto

Para a realização do ensaio de aderência entre camadas asfálticas com o geotêxtil impregnado com asfalto como camada intermediária, foi necessária a moldagem dos corpos de provas cilíndricos em duas etapas: a primeira camada Faixa III DNIT, foi moldada corpos de provas de 150 mm de diâmetro com 60 mm de altura, para isto foi utilizado o compactador giratório (Figura 17). O compactador giratório permite definir o número de giros, a tensão axial, ângulo giratório e velocidade de rotação desejada, permitindo que ele atenda todos os padrões internacionais de compactação giratória.

Após a moldagem da primeira camada de mistura asfáltica e com uma semana de cura do concreto asfáltico se procedeu à moldagem da segunda metade, desta vez com a camada porosa de atrito (CPA), para isto, foi colocado dentro do cilindro do compactador giratório a primeira camada anteriormente moldada, aplicação de uma leve pintura de ligação com emulsão RR-1C, seguido da instalação do geotêxtil impregnado e sobre ele a mistura asfáltica de CPA, para assim, realizar a compactação do conjunto (Figura 18).



Figura 17 – Compactação da primeira camada de mistura asfáltica Faixa III DNIT.



Figura 18 – Colocação do geotêxtil impregnado e compactação da segunda camada de mistura asfáltica em CPA.

O ensaio de cisalhamento direto “Leutner” foi realizado utilizando uma prensa “Instrons”. A carga é aplicada através de uma guilhotina semicircular exatamente na interface onde se encontra a camada intermediária de geotêxtil impregnado na velocidade de 50 mm/minuto (Figura 19). O ensaio finaliza quando o sistema acusa a ruptura em cisalhamento ou deslocamento da camada onde é aplicada a força.



Guillermo Montestruque,
Gustavo Castro da Silva, João Marcos Almeida Fernandes,
Joaquim Rodrigues Gomes Neto & Breno Richard da Silva

Segundo a norma alemã ZTV SIB 90 para corpos de prova de 15 cm de diâmetro a aderência é satisfatória se a carga de cisalhamento aplicada no ensaio for:

- ≥ 15 kN na interface entre a camada de revestimento e binder.
- ≥ 12 kN na interface entre outras camadas asfálticas.

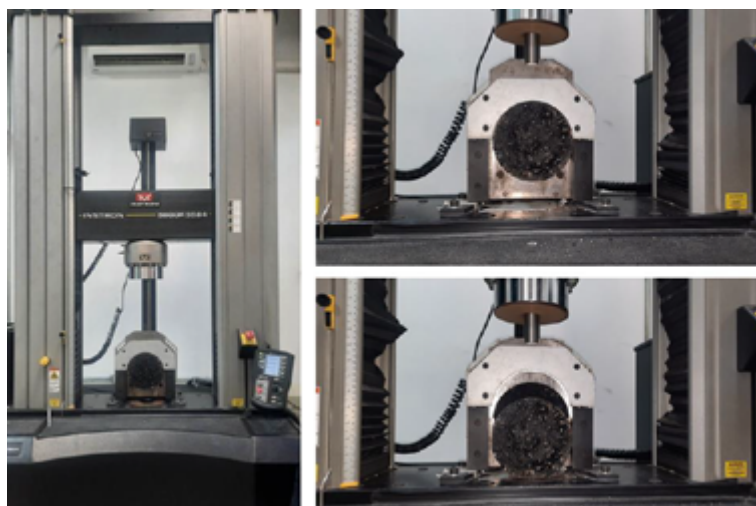


Figura 19 – Ensaio de cisalhamento direto “Leutner” nos corpos de prova sem e com geotêxtil impregnado com asfalto.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto “Leutner” nos corpos de prova sem e com geotêxtil impregnado com asfalto, são apresentados na Figura 20.

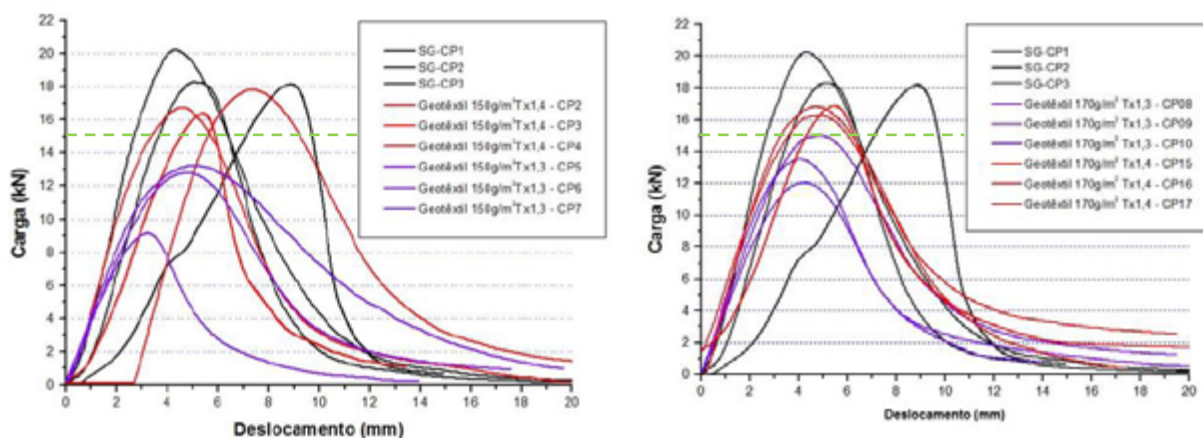


Figura 20 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto “Leutner” nos corpos de prova com geotêxtil de 150 g/m² e 170 g/m² impregnado com asfalto.

4 CONCLUSÕES

- ❖ Foi possível observar que a taxa de impregnação de 1,2 l/m² não foi o suficiente para impermeabilizar, porém as taxas de impregnação de 1,3 l/m² e 1,4 l/m² foram satisfatórias para impermeabilizar os geotêxtil de 150 g/m² e 170g/m² respectivamente, suportando a carga de água.



DOI: [10.29327/1430212.49-105](https://doi.org/10.29327/1430212.49-105)

INOVADORA VERSÃO DO GEOTÊXTIL NÃO TECIDO IMPREGNADO COM ASFALTO COMO CAMADA INTERMEDIÁRIA IMPERMEÁVEL E REDUTORA DA REFLEXÃO DAS TRINCAS

- ❖ Através dos ensaios de impermeabilidade dos corpos de prova de CPA com geotêxtil impregnado, conclui-se que, o geotêxtil não tecido impregnado com asfalto utilizado como camada intermediária na camada porosa de atrito é uma excelente alternativa de restauração de pavimentos trincados, uma vez que auxilia em não acumular água sobre o revestimento asfáltico, além de evitar a infiltração da água nas camadas subjacentes da estrutura do pavimento, desta forma a CPA cumpre sua função de aumentar o atrito entre o revestimento e os pneus dos veículos, evitando com que haja derrapagem dos mesmos e tornando o pavimento mais seguro.
- ❖ A taxa de 1,4 l/m² foi satisfatória na aderência e demonstram a eficiência da camada de geossintético como camada intermediária. Ressalta-se que em uma restauração de pavimentos geralmente é realizado uma fresagem é de se esperar que o atrito aumente e conseqüentemente devam se atingir valores superiores aos obtidos em laboratório.

COMENTÁRIOS FINAIS

Montestruque (2002), concluiu que o geotêxtil não tecido, quando bem impregnado, garante aderência, estabilidade, resistência mecânica, e maior vida de serviço do pavimento, se tornando uma opção altamente vantajosa para os que procuram soluções em recapeamentos asfálticos.

Finalizando o geotêxtil impregnado com asfalto é uma técnica que foi utilizada em Brasil, Sul America e no mundo com bastante sucesso, nos locais que foram especificados e aplicados corretamente. Esta técnica desapareceu no Brasil, porque surgiram problemas de escorregamento da massa asfáltica devido uma deficiente impregnação com asfalto em campo. Este problema seria eliminado se este material fosse impregnado em fabrica com rigoroso controle de qualidade, neste contexto, em obra bastaria apenas desenrolar a bobina e aplicar em seguida a mistura asfáltica de recapeamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINT. - Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos. Curso Básico de Geotêxteis. Janeiro, 2001.

ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos).- Manual básico de emulsões asfálticas: soluções para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro. 2001.

BAUER, L.A.F. Materiais de Construção. 5ª Edição. Brasil: Livro Técnico e Científico Editora, Volume 2, 1999.

ZTV-SIB 90 - German Testing Specification.

MONTESTRUQUE, G.- “Contribuição para a Elaboração de Método de Projeto de Restauração de Pavimentos Asfálticos Utilizando Geossintéticos em Sistemas Anti-Reflexão de Trincas”. Tese de doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutico. São José dos Campos, São Paulo, Brasil, novembro 2002.

AGRADECIMENTOS

- ❖ Especial agradecimento ao Dr. Eng. Luis Miguel Gutierrez Klinsky, Eng. Geraldo Pereira ao Téc. Cleto Damasceno e toda a equipe do Centro de Pesquisa Rodoviário da Concessionária RioSP, pelo fornecimento das instalações e equipamentos necessários para as moldagens dos corpos de provas asfálticos utilizados nesta pesquisa.
- ❖ À empresa Maccaferri do Brasil pelo fornecimento dos geotêxteis não tecidos utilizados nesta pesquisa.
- ❖ À Prof.^a Dr.^a. Nara Oliveira Yokoyama, Coordenadora do Curso de Engenharia Civil, UNIVAP.



Adequação da norma brasileira PRO-011 em sistema de Gerenciamento de Pavimentos

Alejandro Anguiano Acquart¹; Edwin Fernando Ruiz Blanco²; Esther Pozo Caro³

RESUMO

O Sistema de Gestão de Pavimentos em estudo é uma ferramenta de software que permite aos usuários terem acesso a informações completas e organizadas sobre os ativos de redes rodoviárias incorporadas dentro do mesmo, bem como gerenciar a conservação, manutenção e operação das estruturas de pavimentos correspondentes de forma abrangente. O sistema permite conhecer e representar de diversas maneiras as características e o estado atual das estruturas de pavimentos das rodovias cadastradas. Adicionalmente, e a partir dos dados disponíveis e da configuração de ferramentas de decisão integrais, o sistema permite definir os trechos que requerem algum tipo de intervenção para propósitos de manutenção nessas estruturas, estabelecendo os períodos mais adequados para concretizar esses trabalhos em função de critérios técnicos e econômicos preestabelecidos. Dentro das adaptações feitas no sistema de gerenciamento para atender às necessidades de um conjunto de concessionárias brasileiras, foram implementados, dentro do Módulo PMS, os cálculos necessários para determinar a espessura de reforço necessária conforme estabelecido pela norma DNER-PRO 011/79, publicada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). O presente documento tem como objetivo mostrar o conjunto de desenvolvimentos técnicos realizados para a implementação da norma no referido sistema, bem como suas aplicações na restauração de pavimentos no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: SGP, Gerência de Pavimentos, Reforço, PRO-011.

ABSTRACT

The pavement management system under study is a software tool that allows users to access comprehensive and organized information about assets of road networks incorporated within it, as well as manage the conservation, maintenance, and operation of corresponding pavement structures comprehensively. The system enables several ways to understand and represent the characteristics and current state of registered highways pavement structures. Additionally, based on available data and the configuration of integral decision-making tools, the system allows for defining sections requiring pavement interventions for maintenance purposes, establishing the most suitable periods to carry out these works based on pre-established technical and economic criteria. As part of the adaptations made to the Management System to meet the needs a set of Brazilian concessionaires, the necessary calculations to determine the required reinforcement thickness have been implemented within the PMS (Pavement Management System) Module of the system, as established by the DNER-PRO 011/79 standard published by the National Department of Transport Infrastructure (DNIT). This document aims to showcase the set of technical developments made for the implementation of the standard in the aforementioned Management System, as well as its applications in pavement rehabilitation in Brazil.

KEY WORDS: Pavement Management system, PMS, Reinforcement, PRO-011.

¹ Rauros – Grupo Typsa; alanguiano@raurospe.com

² Engecorps – Grupo Typsa; edwinfernando.ruiz@engecorps.com.br

³ Rauros – Grupo Typsa; epozo@rauroszm.com



[DOI: 10.29327/1430212.49-101](https://doi.org/10.29327/1430212.49-101)

ADEQUAÇÃO DA NORMA BRASILEIRA PRO-011 EM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS

CONTEXTO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um dos pontos mais importantes quando se fala de pavimentos é o projeto e manutenção, já que, geralmente, os montantes de investimento nesses itens costumam ser o fator determinante da viabilidade ou não de um projeto, por isso estimar corretamente as espessuras das camadas é um processo crucial e deve ser executado com precisão.

Com o tempo, diferentes metodologias foram implementadas ao redor do mundo para o cálculo do reforço estrutural. Os primeiros métodos mundialmente aceitos foram os métodos da AASHTO e do Instituto de Asfalto dos Estados Unidos, que produziram seus primeiros resultados na década de 1950. Esses métodos eram baseados na repetição de cargas sobre o pavimento e na deformação das camadas existentes.

Esses métodos evoluíram ao longo do tempo até que, na década de 1990, começaram a basear seus cálculos nas leis de fadiga e deformação de pavimentos multicamadas e posteriormente, na década de 2000, utilizando a metodologia de elementos finitos.

Por sua vez, o contexto brasileiro apresenta particularidades únicas por ser um país com uma enorme extensão de terra e uma grande rede de estradas. O Ministério dos Transportes do Brasil, em conjunto com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), são responsáveis por normatizar e regular as metodologias utilizadas na construção e manutenção de estradas federais e concedidas, visando proporcionar aos usuários as melhores condições de viabilidade.

O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) foi criado em 1937, suprimindo a antiga Comissão Federal de Estradas em Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Um de seus principais objetivos era desenvolver o plano geral de estradas nacionais, executar e/ou supervisionar obras e melhorias nas estradas nacionais, bem como a política de estradas e pontes nacionais.

Com a Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001, que reestruturou os transportes fluviais e terrestres, o DNER foi extinto e criado em seu lugar o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). O objetivo da autarquia é aplicar a política de infraestrutura de transporte terrestre e fluvial, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do país.

Os fundos para a realização das obras provêm do Governo Federal. Em outras palavras, o DNIT é o gestor e executor, sob a jurisdição do Ministério dos Transportes, das vias navegáveis, ferrovias e estradas federais, das instalações de transbordo e interface intermodal e das instalações portuárias fluviais e lacustres.

Dentro das atividades realizadas pelo DNIT está a criação e atualização das normas e procedimentos para a avaliação e manutenção das estradas.

Para isso, o DNIT conta com a norma DNER-PRO 011/79, procedimento – B, que tem por objetivo estabelecer os procedimentos necessários para a avaliação estrutural dos pavimentos



flexíveis existentes, apontar as causas de suas deficiências e fornecer elementos para calcular a vida útil restante ou o reforço necessário para um novo número de esforços equivalentes ao eixo padrão durante o período considerado.

Essa norma estabelece o procedimento a ser seguido para calcular, com base nas deflexões do pavimento, o reforço necessário.

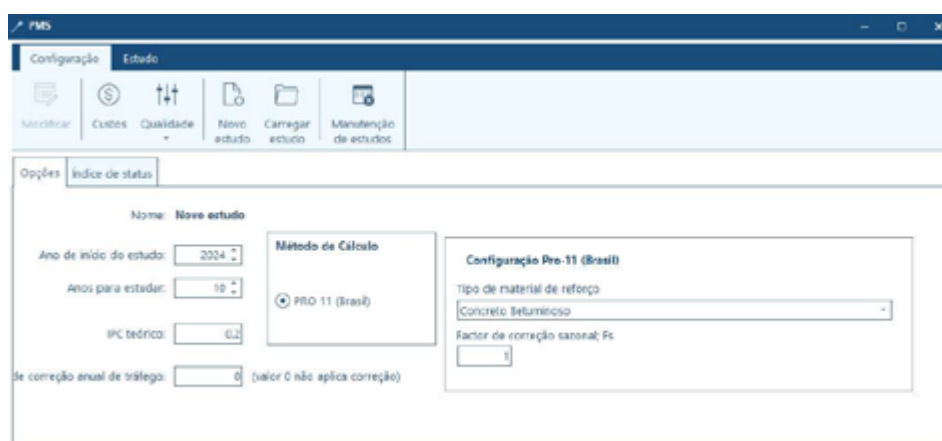


Figura 1. Sistema de Gerência de Pavimentos em estudo. - Fonte: SGP ICARO (Grupo Rauros-Engcorps).

A seguir, será apresentada a metodologia e os resultados da aplicação desse procedimento no sistema de gestão em estudo.

METODOLOGIA DESENVOLVIDA

A metodologia descrita a seguir foi considerada no processo de adequação do Sistema de Gerenciamento ÍCARO aos requisitos técnicos exigidos por uma concessionária rodoviária com atuação no Brasil. O referido Sistema de Gestão Rodoviária é um desenvolvimento informatizado composto por uma série de ferramentas e módulos, por meio das quais é possível gerenciar vários elementos, principalmente as estruturas de pavimentos, de uma rede rodoviária de forma integrada. O Sistema ÍCARO é um desenvolvimento 100% do Grupo Rauros, parte integrante do Grupo internacional TYPASA, representado nacionalmente através da sua subsidiária de Engenharia consultiva, ENGECORPS. O sistema conta com mais de 20 anos de aplicação em concessionárias privadas e órgãos públicos na Europa, Oriente Médio e América Latina.

A norma DNER-PRO 011/79, procedimento – B, serviu como base para implementar o cálculo do reforço no Sistema de Gerenciamento em estudo. O Sistema é capaz de armazenar informações relativas à geometria, seção atual estrutural do pavimento, tráfego, campanhas de auscultação realizadas sobre o pavimento entre outros dados técnicos de caracterização da rede rodoviária.

Com todas essas informações, o sistema gera, em um módulo específico, a segmentação homogênea da rodovia para propósitos de análise. Essa segmentação é feita de acordo com as



[DOI: 10.29327/1430212.49-101](https://doi.org/10.29327/1430212.49-101)

ADEQUAÇÃO DA NORMA BRASILEIRA PRO-011 EM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS

necessidades de conservação e a critério do engenheiro responsável por executar esses planos, embora conte com ferramentas que facilitem o trabalho do técnico, como a realização de segmentações automáticas com base em critérios de tráfego, tipologia de pavimentos etc. Uma vez concluído isso, o sistema gera automaticamente valores estatísticos para definir cada segmento homogêneo com base nos parâmetros de auscultação armazenados.

Para o correto funcionamento da ferramenta, é necessário contar com os dados armazenados da tomada de deflexões sobre o pavimento.

Quando são feitas as medições de deflexões sobre o pavimento, um dos métodos mais comuns é utilizar um equipamento chamado deflectômetro de impacto (FWD). Esse equipamento é capaz de simular as cargas geradas por um veículo pesado passando sobre o pavimento por meio do uso de massas. Essas massas são impactadas contra o pavimento e, por meio de uma série de sensores chamados geofone, é possível transformar o sinal obtido pelo impacto em deformações.

A deformação causada pelo impacto é chamada de deflexão. Os geofones estão localizados em diferentes distâncias em relação ao centro da massa, com o objetivo de medir a resposta (deformação) do pavimento em cada um desses pontos e conhecer o afundamento da deflexão. A deflexão medida diretamente abaixo da massa é chamada de deflexão máxima e, por meio desse valor, é possível conhecer o estado da camada de rodagem de um pavimento.

Seguindo a Norma DNER-PRO 011/79, os dados iniciais necessários para o cálculo do reforço de um pavimento são os seguintes:

- Deflexão Característica da seção homogênea (D_c).
- Deflexão de projeto (Correção sazonal) (D_p).
- Deflexão admissível (D_{adm}).
- Índice de gravidade global (IGG).
- Tipo de material de reforço.

Para a programação dentro do sistema de gerenciamento, foram consideradas as seguintes informações:

A deflexão característica (D_c) é assumida como a média aritmética dos pontos amostrados na seção homogênea. A deflexão de projeto (D_p) é o produto da deflexão característica multiplicada pelo fator sazonal (F_s). Para determinar o fator sazonal dentro no sistema, foi adicionada uma caixa de entrada na qual o usuário deve inserir o fator a ser utilizado.



Alejandro Anguiano Acquart,
Edwin Fernando Ruiz Blanco,
Esther Pozo Caro

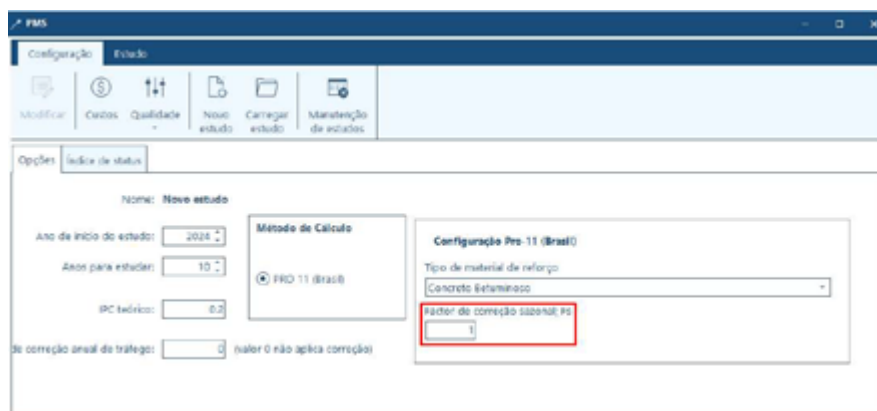


Figura 2. Inclusão do fator sazonal. - Fonte: SGP ICARO (Grupo Rauros-Engecorps).

Para o caso da deflexão admissível (D_{adm}) no sistema, foi considerado o limite máximo permitido para a rodovia. Esse valor pode ser inserido pelo usuário conforme mostrado na Figura 3.

Níveis Gerais de Qualidade

Parâmetro	Forçado
Pavimento : Flexível	
Textura (mm)	0.7
ATR (mm)	5
IRI (m/Km)	2.7
Deflexões (mm/100)	50
Fissuração Total (%)	30

Figura 3. Limite máximo de deflexão utilizado como deflexão admissível. - Fonte: SGP ICARO (Grupo Rauros-Engecorps).

O IGG é assumido como a média aritmética dos pontos amostrados na seção homogênea. Para o tipo de material de reforço, foi adicionado uma lista suspensa com as opções disponíveis de materiais e seus coeficientes de equivalência estrutural correspondente. Essa lista foi elaborada de acordo com descrição apresentada na Tabela IV da norma DNER-PRO 011/79.



DOI: 10.29327/1430212.49-101

ADEQUAÇÃO DA NORMA BRASILEIRA PRO-011 EM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS

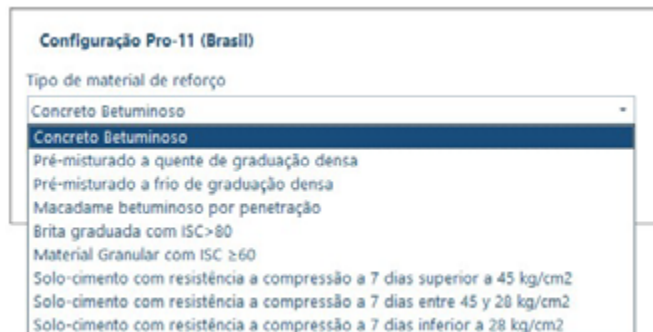


Figura 4. Lista para seleção do material da camada de reforço. Fonte: SGP ICARO (Grupo Rauros-Engecorps).

Com os parâmetros anteriores, o sistema de gestão foi programado para realizar o cálculo do reforço necessário utilizando a seguinte lógica:

- I. Calcula-se a deflexão de projeto utilizando a equação (1):

$$D_p = D_c * F_s \quad (1)$$

- II. Avalia-se a necessidade de reforço. Para isso, utiliza-se a lógica da Tabela II mostrada na norma DNER-PRO 011/79. (critérios para avaliação estrutural).

De acordo com a lógica acima, o sistema de gestão avalia o valor médio do parâmetro IGG. Se este for maior que 180, automaticamente recomenda-se executar um trabalho de reconstrução. IGG é assumido como a média aritmética dos pontos amostrados na seção homogênea.

- Se o IGG for menor que 180, o sistema verifica se a deflexão de projeto (D_p) é maior que a deflexão admissível (D_{adm}). Se (D_p) for menor que (D_{adm}), a sequência termina com um valor de reforço de 0 cm. Se (D_{adm}) for menor que (D_p), o cálculo do reforço continua nos seguintes passos.

- III. Realiza-se o dimensionamento do reforço do pavimento utilizando a equação (2):

$$h = K * \text{Log} \frac{D_p}{D_{adm}} \quad (2)$$

Onde:

h = Espessura necessária de reforço expressa em cm.

K = Fator de redução de deflexão próprio do material, que, de acordo com a normativa, deve ser usado um valor de 40 para concreto betuminoso.

- IV. Conhecido o valor da espessura necessária, faz-se a correção em função do tipo de material usado para o reforço empregando a equação (3):

$$hf = h * \text{fator de material usado} \quad (3)$$



Alejandro Anguiano Acquart,
Edwin Fernando Ruiz Blanco,
Esther Pozo Caro

Com o intuito de conhecer o fator de material usado, é empregada a equação (4), seguindo o descrito na Tabela IV da norma DNER-PRO 011/79:

$$\text{Coef. equiv. estrutural do material utilizado} = \frac{2,00}{\quad} \quad (4)$$

- V. Por último, utiliza-se o seguinte critério lógico para decidir o trabalho final recomendado a ser executado na rodovia:
- Se o reforço for maior que 9 cm, recomenda-se a reconstrução do pavimento.
 - Se o reforço for maior que 2,5 cm e menor que 9 cm, recomenda-se o reforço com o material selecionado da Tabela IV da norma.
 - Se o reforço for menor ou igual a 2,5 cm, recomenda-se o reforço com uma camada do tipo GAP Graded.

É importante observar que os trabalhos de adequação descritos acima foram realizados em conjunto com uma concessionária específica de modo a atender necessidades técnicas particulares. Os reforços projetados, bem como as modificações na seleção da (D_{adm}), foram realizados de acordo esses requerimentos específicos. Também é relevante mencionar que o cálculo dos eixos equivalentes ou do número N está presente nos cálculos para a redefinição da deflexão pós-obra, bem como para a evolução dos diferentes parâmetros que o sistema considera.

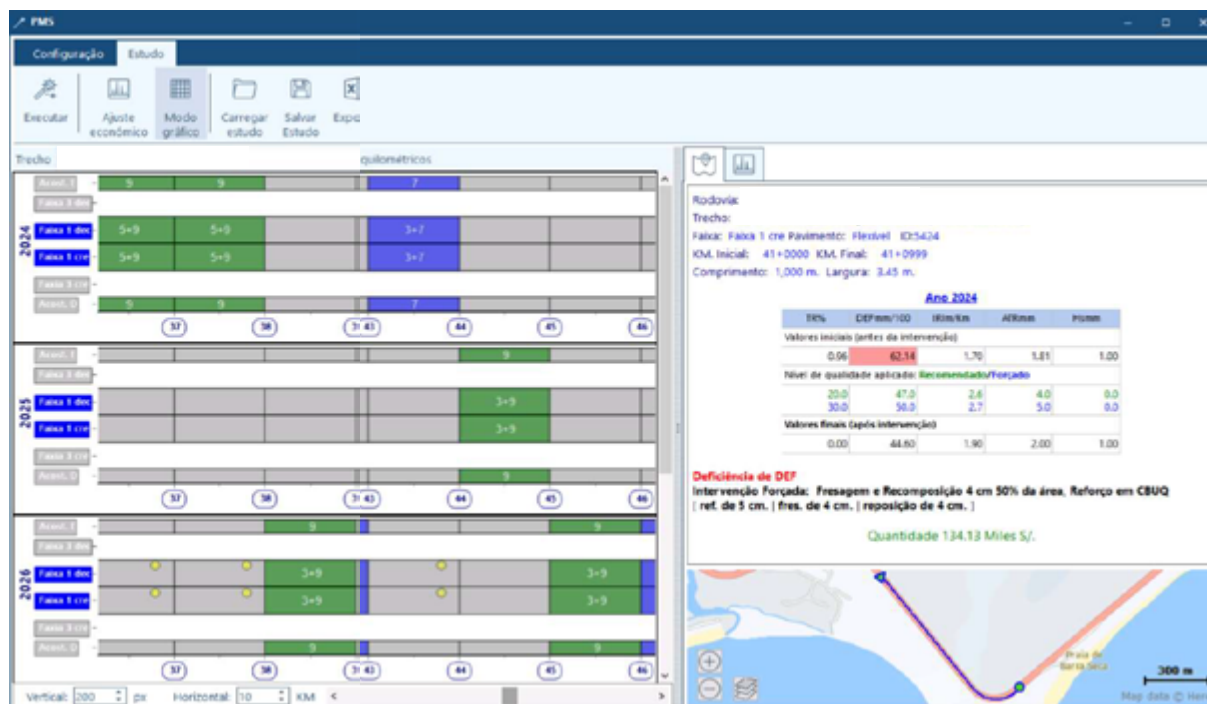


Figura 5. Apresentação de análise de intervenções no sistema em estudo. Fonte: SGP ICARO (Grupo Rauros-Engençorps).



[DOI: 10.29327/1430212.49-101](https://doi.org/10.29327/1430212.49-101)

ADEQUAÇÃO DA NORMA BRASILEIRA PRO-011 EM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS

VALIDAÇÃO E ESCOPO DE APLICAÇÃO

A adaptação da norma DNER-PRO 011/79 ao Sistema de Gerenciamento ICARO foi realizada recentemente com o objetivo de auxiliar às concessionárias na tomada de decisões técnicas e econômicas nos processos de restauração e conservação de pavimentos.

A integração da norma DNER-PRO 011/79 no sistema ICARO está em fase de validação final, um procedimento que inclui a realização de um amplo conjunto de testes e análises comparativas com dados históricos disponíveis, procedimentos de cálculo internacionais e outras metodologias convencionais anteriormente utilizadas. Os primeiros resultados indicam que as intervenções recomendadas pelo SGP em estudo estão de acordo com as patologias das estruturas de pavimento cadastradas. No entanto, ainda há desafios na calibração adequada dos resultados pós-obra, o que exigirá um volume maior de dados a ser considerado (por exemplo, medições de vários anos consecutivos e registro de informações adicionais de monitoramento) de modo que o sistema reflita com maior precisão as características reais do pavimento após a execução de uma determinada intervenção.

Adicionalmente, o escopo e as limitações da própria norma, bem como o procedimento de adaptação a metodologias mais atuais para determinar o desempenho do pavimento, precisarão ser estudados com maior profundidade nas etapas de implantação posteriores.

CONCLUSÕES

Atualmente, o uso de sistemas computacionais para o desenvolvimento das atividades laborais é quase indispensável. No contexto específico das vias terrestres e da engenharia aplicada a elas, o uso de softwares e ferramentas de apoio é fundamental para tentar prever de maneira mais precisa os comportamentos dos pavimentos e estimar as soluções a serem aplicadas neles. Contar com um Sistema de Gestão de Pavimentos atualizado e que implemente a normativa regional de um país torna-se um ativo importante para facilitar e otimizar o trabalho das concessionárias rodoviárias, além de manter-se na vanguarda no campo da engenharia rodoviária. A metodologia apresentada na Norma DNER-PRO 011/79, procedimento – B, foi programada, automatizada e incorporada dentro do Sistema de Gerenciamento em estudo. Os parâmetros utilizados nas equações de cálculo são armazenados no próprio Sistema de Gestão, tornando-o uma ferramenta de fácil uso. A interface gráfica permite entender melhor os resultados, mesmo para aqueles que não possuem conhecimentos especializados em engenharia de pavimentos.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO. The AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993*. Washington, DC.: AASHTO.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1979). *Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis. Procedimiento - B*. DNER/DrDTc.



Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) . (22 de abril de 2024). *Ministerio dos Transportes*. Obtenido de Ministerio dos Transportes: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/acesso-a-informacao/institucional>

Diretório Brasil de Arquivos. (22 de abril de 2024). *Arquivo Nacional, Diretório Brasil de Arquivos*. Obtenido de Arquivo Nacional, Diretório Brasil de Arquivos: <https://dibrarq.arquivonacional.gov.br/index.php/departamento-nacional-de-estradas-de-rodagem-brasil-1937-2001>

Grupo RAUROS. (01 de 06 de 2024). *Grupo Rauros*. Obtenido de Grupo Rauros: <https://www.gruporauros.com/>



REMODELAGEM E ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS DO DNIT (SGP-DNIT)

Mateus Aguiar Lima¹; Karina Soares da Costa e Oliveira¹; Vinicius Quintiliano Pereira¹; Leonardo Fabri de Moraes¹; Cintia Adriana Azevedo de Liz Anhaia²; Régis Martins Rodrigues³ & Luiz Guilherme Rodrigues de Mello⁴

RESUMO

Um sistema de gerência de pavimentos (SGP) visa manter e garantir uma infraestrutura viária em condições adequadas de trafegabilidade, de segurança e de conforto para os usuários, adotando estratégias de manutenção, com a maximização da relação benefício-custo, que melhorem o pavimento. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é responsável por gerenciar uma malha rodoviária federal pavimentada de mais de 50.000 km. Dada a complexidade das análises e a quantidade de dados a serem considerados, o órgão contratou a remodelagem do SGP existente. Este trabalho apresenta as ações realizadas para modernizar, organizar e estruturar os dados no SGP com objetivo de aprimorar suas análises e apoiar a tomada de decisão dos gestores. A partir do diagnóstico do sistema, do mapeamento de processos e dados existentes no órgão, foram definidos os dados relevantes e as análises a serem introduzidos no sistema. Atualmente, o SGP-DNIT, completo e operacional, permite consultar dados de levantamento e de condição da superfície da malha; analisar a condição atual do pavimento; determinar as necessidades atuais de manutenção; simular e comparar cenários de investimentos, por fim, gerar planos plurianuais de investimento, com ou sem restrições orçamentárias, para auxiliar os gestores na identificação da melhor estratégia de investimentos em manutenção rodoviária. Assim, espera-se avançar das ações de manutenção corretiva para ações de manutenção preventiva, buscando atingir a máxima eficácia nos investimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Remodelagem; Modelos de previsão de desempenho; Árvores de decisão; Índices de desempenho; Cenários de investimentos.

ABSTRACT

A Pavement monitoring system (PMS) seems to maintain and ensure a road infrastructure in adequate conditions of trafficability, safety, and comfort for users adopting maintenance strategies, with the maximization of the benefit-cost ratio, that improve the pavement. The National Department of Transportation Infrastructure (DNIT) is responsible for managing a paved road network spanning over 50,000 km. Given the complexity of analyses and the quantity of data to be considered, the agency contracted the redesign of the existing SGP. This work presents the actions made to modernize, organize, and structure data in the PMS, aiming to improve its analyses and assist managers' decision-making. Through diagnosing the system, mapping processes and data existing in the agency, were defined relevant data e analyses to be considered in the system. Thus, DNIT' PMS, completed e functional, allows consult data e the surface condition, analyse current network condition, determine current maintenance interventions, simulate e compare maintenance strategies, finally, generate mult-year plans, with or without budget restrictions, to assist managers in identifying the best maintenance strategy. Thus, a shift from corrective maintenance actions to preventive maintenance actions is taken, aiming to achieve maximum effectiveness in investments.

KEY WORDS: Remodeling; Performance prediction models; Decision trees; Performance indices; Investment scenarios.

¹ Consórcio Engefoto-Pavesys, mateuslima@consorcioep.com.br; karinaoliveira@consorcioep.com.br; viniciuspereira@consorcioep.com.br; leonardomoraes@consorcioep.com.br

² ENGEFOTO, cintializ@engefoto.com.br

³ PAVESYS, regis@pavesys.com.br

⁴ DNIT, luiz.mello@dnit.gov.br



1 INTRODUÇÃO

A gerência de pavimentos é um conjunto amplo de atividades que consistem em ações voltadas para o planejamento, o projeto, a construção, a manutenção, a avaliação e a pesquisa de pavimentos de uma determinada infraestrutura viária. Assim, a gerência desempenha um papel importante dentro das mais diversas atividades de um determinado órgão ou instituição.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é responsável pela administração de uma malha rodoviária federal pavimentada de mais de 50 mil quilômetros. Dada essa extensão, é desafiador e complexo seu o gerenciamento e a concepção de métodos, de diretrizes e de ferramentas para indicar a melhor forma de gerenciá-la. Neste aspecto, desde 1980, o DNIT, na época DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), tem empreendido diversos esforços para implantar e fortalecer a gerência de pavimentos na autarquia. Foram desenvolvidas metodologias e normas para levantamento da condição da superfície dos pavimentos, além do próprio Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) e manual desse sistema. Diversas campanhas de levantamento de coleta de dados em campo são realizadas frequentemente para alimentar o banco de dados do SGP do DNIT. Atualmente, está em andamento, no âmbito da Diretoria de Planejamento e Pesquisa (DPP), o contrato, firmado com o Consórcio Engefoto-Pavesys, de engenharia consultiva para remodelagem do SGP, visando ampliar a gerência com alinhamento às diretrizes internacionais de gestão de ativos.

O objetivo deste artigo é apresentar a remodelagem do SGP-DNIT realizada entre os anos de 2022 e 2024 a fim de atualizar e modernizar o sistema existente no maior órgão de infraestrutura do Brasil.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Um sistema de gerência de pavimentos é um conjunto coordenado de ferramentas, naturalmente, associado a um banco de dados, para auxiliar os gestores na tomada de decisão quanto à identificação das estratégias mais eficientes e eficazes para manter, durante um certo período, o pavimento em condições aceitáveis de trafegabilidade, de conforto e de segurança para o usuário com o menor custo possível. Assim, é primordial que o sistema detecte o que é preciso fazer, aonde e quando, observando prioridades, políticas e restrições orçamentárias de uma organização.

Quando um pavimento é novo ou recém-restaurado, ele se deteriora lentamente durante um tempo mais longo e isso propicia custos menores de manutenção. Com o início da fase de trincamento por fadiga, a velocidade de deterioração aumenta substancialmente, elevando os custos de manutenção e reduzindo o tempo para que o pavimento entre em colapso, caso não sejam realizadas as intervenções adequadas para prolongar a vida útil. A Figura 1, a seguir, retrata um exemplo de comportamento de desempenho de um pavimento asfáltico em função do tempo durante as fases pré e pós trincamento.



DOI: 10.29327/1430212.49-100

REMODELAGEM E ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS DO DNIT (SGP-DNIT)

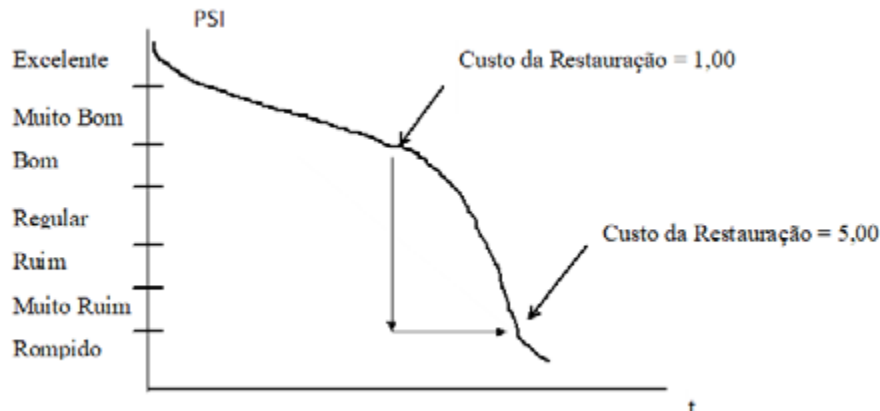


Figura 1. Comportamento típico de desempenho de um pavimento (Adaptado de SHAIN e WALTHER, 1990).

O objetivo central de um SGP é manter e elevar o nível de serviço dos pavimentos para o usuário de modo a minimizar os custos de manutenção. Assim, o sistema tem diversas funções e finalidades, dentre elas, assegurar consistência nas decisões em diferentes níveis de uma mesma organização; aumentar a eficiência do processo de tomada de decisão; fornecer resposta acerca das consequências dessas decisões; garantir um sistema de transporte seguro, confortável e econômico; obter o melhor retorno para os recursos disponíveis, bem como, determinar a importância relativa de fatores locais que possam contribuir para a deterioração dos pavimentos.

Um SGP deve atender desde o nível de decisão do planejamento, a mais alta administração da instituição, com informações sobre as sínteses da condição e das necessidades da rede, o padrão futuro face os recursos disponíveis e a estratégia de manutenção com o maior retorno econômico dos investimentos para a sociedade. Até os engenheiros projetistas, contexto operacional, com informações úteis sobre diretrizes de soluções técnicas eficazes de manutenção.

O SGP é uma ferramenta multiusuário, para responder os variados questionamentos de uma organização e perseguir a aplicação das soluções de maior custo-benefício possíveis, baseada em conceitos e ferramentas, pautados na engenharia de pavimentos, que apontem um diagnóstico consistente, observando tipos, extensão e severidade dos defeitos, além da idade e estrutura do pavimento, bem como, o tráfego atuante. Ainda, que trabalhem com modelos de previsão de desempenho precisos para pavimentos e para as técnicas de manutenção. Por fim, que retratem coerência entre o requerido pelos modelos aplicáveis no âmbito do projeto e os utilizados em rede para diminuir a distância entre o requisitado em cada âmbito de decisão com o intuito de assegurar recurso suficiente para resolução dos problemas identificados na avaliação.

Para concepção, primeiramente, deve-se observar os componentes que precisam compor o sistema. A Figura 2, na sequência, compara os elementos básicos de acordo com (a) o *The AASHTO Pavement Management Guide* (2012) e (b) o Manual de Gerência de Pavimento do DNIT (2011). Ambos evidenciam a importância de montar a base do inventário da rede viária com o máximo de dados relevantes sobre ela; ter módulos de análises; gerar cenários e planos de investimentos de acordo com prioridades.



Mateus Aguiar Lima, Karina Soares da Costa e Oliveira, Vinicius Quintiliano Pereira, Leonardo Fabri de Moraes, Cintia Adriana Azevedo de Liz Anhaia, Régis Martins Rodrigues & Luiz Guilherme Rodrigues de Mello

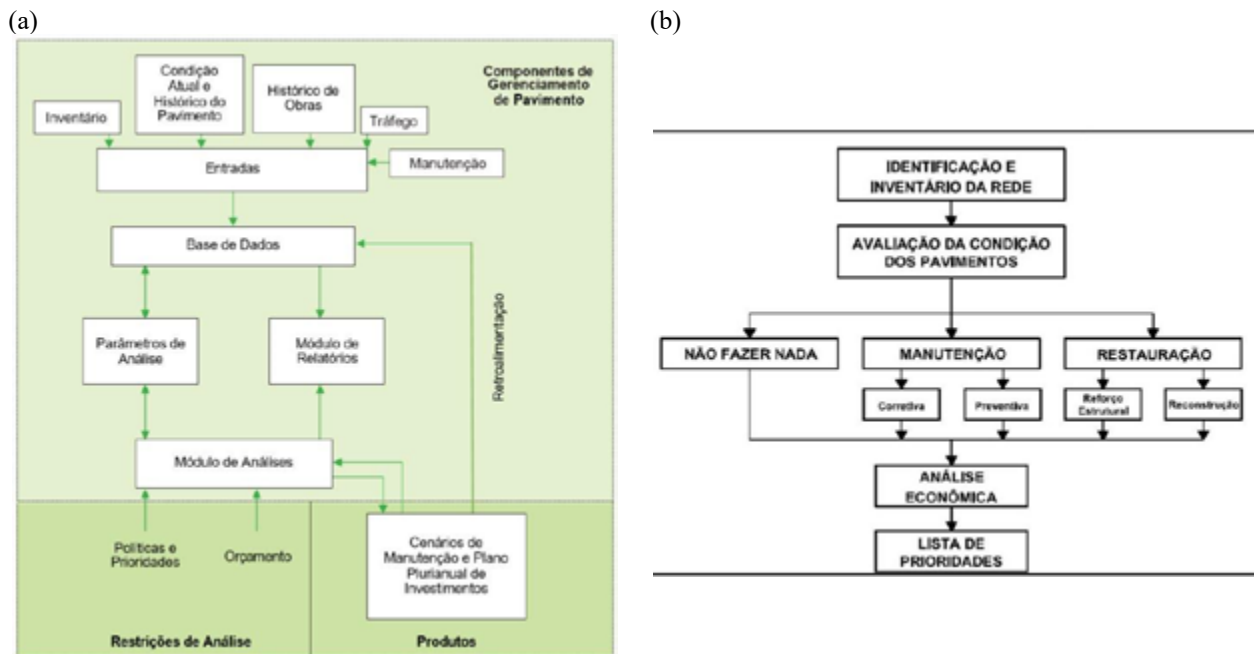


Figura 2. Componentes básicos de um sistema de gerenciamento de pavimentos, segundo (a) Guia da AASHTO (Adaptado de AASHTO, 2012) e (b) IPR-745 (DNIT, 2011).

Em seguida, definir as informações a serem levantadas, os critérios, os indicadores de desempenho e a frequência desses levantamentos. Prever a organização e o armazenamento dos dados para serem utilizados no processo de decisão. Estabelecer como os módulos de análises identificarão a condição atual da rede avaliada, irão prever o comportamento futuro e realizarão o diagnóstico consistente que expresse as reais necessidades de manutenção para simulação de cenários e elaboração de planos plurianuais de investimento com ênfase nas prioridades, nas políticas e nas restrições que acometem um órgão. Por fim, incluir o processo de monitoramento da rede e de retroalimentação das informações executadas por esses planos para aprimorar as análises futuras.

Todos esses aspectos foram considerados durante a remodelagem do SGP do DNIT, além do diagnóstico do sistema existente no órgão. O sistema anterior basicamente armazenava os dados de levantamento e gerava gráficos que demonstravam a condição da superfície. Não continha módulos para retroanalisar bacias de deflexão, prever o desempenho do pavimento, determinar soluções de manutenção, simular e comparar cenários de investimentos e, por fim, gerar planos de investimentos.

3 IMPORTAÇÃO DE DADOS

O primeiro passo considerado foi a estruturação e consolidação do banco de dados do SGP-DNIT. Após mapeamento dos dados relevantes para a gestão do pavimento, verificou-se que a maior parte desses dados é proveniente da Coordenação de Levantamentos para Planejamento (COLEP), responsável pelos contratos de levantamento visual contínuo (LVC), de coleta dos dados das bacias de deflexão, do tráfego e da estrutura de pavimento (*as built*).



DOI: [10.29327/1430212.49-100](https://doi.org/10.29327/1430212.49-100)

REMODELAGEM E ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS DO DNIT (SGP-DNIT)

A base de dados é composta da seguinte forma:

- Cadastro de rodovias: informações das rodovias federais pavimentadas de acordo com o Sistema Nacional de Viação (SNV);
- Avaliação funcional e estado da superfície: provenientes dos contratos anuais de LVC com uso do veículo de diagnóstico de rodovias (VDR) por meio de vídeo registro que possibilita a aquisição de dados da condição da superfície, sendo eles: índice de irregularidade longitudinal (IRI), *present serviceability index* (PSI), afundamentos de trilha de roda (ATR), defeitos do pavimento, índice de gravidade global (IGG), o *surface condition index* (SCI) e índice de condição da superfície (ICS);
- Avaliação estrutural: entre 2020 e 2021, foi realizada campanha de levantamento das bacias de deflexão com o equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD) a cada 200 metros, de forma alternada, na malha viária de responsabilidade da autarquia;
- Tráfego: oriundo do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) que fornece dados de contagem volumétrica por categoria de veículos, estimativa de volume médio diário anual (VMDa) e dados de pesagem a partir de balanças fixas implantadas pelo plano;
- Estrutura de pavimento: consumidos da ferramenta *As Built*;
- Condições climáticas: pluviometria e temperaturas médias a partir de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia);
- Custos: referência no Sistema de Custos Rodoviários do DNIT (SICRO).

Durante o processo de importação desses dados para a base em comento, primeiro, determinou-se a extensão da menor unidade de análise (UA), no caso do atual SGP-DNIT, igual a 100 metros (m).

O cadastro das rodovias utilizou o SNV que fornece para cada trecho rodoviário informações de localização e características. Dessas informações o SGP-DNIT considera: UF, código da rodovia (“BR”), código do SNV, quilômetros inicial e final, e classificação da superfície quanto a ser Simples ou Duplicada. Assim, todos os dados de levantamento foram agrupados com o intuito de preencher esse cadastro para a menor UA. Em razão das diferentes versões de SNV utilizadas, nos levantamentos realizados, em relação ao SNV mais atual do órgão, cadastrado no sistema, foram consultadas as coordenadas geográficas desses dados para localizá-los espacialmente no referido SNV. Essa técnica automatizada facilitará as futuras atualizações do banco, mantendo as informações vinculadas sempre ao SNV mais recente que o DNIT publique.

Os dados do LVC possuem a maior frequência de atualização no SGP-DNIT. Para consolidação no banco do sistema, adaptou-se o cálculo do IGG, uma vez que a Norma DNIT 006/2023-PRO considera a ocorrência dos defeitos em uma área de apenas 6 metros pela extensão da faixa de tráfego, a cada 20 metros de pista, alternadamente nas pistas simples e nas faixas mais solicitadas em pista duplicada. O que difere da forma como o VDR registra os defeitos, pois a marcação considera toda a plataforma da pista de rolamento pela extensão levantada em campo. Assim, sintetizou-se os defeitos averiguados em estações a cada 20 metros, do trecho levantado, para o cálculo do IGG e do SCI referentes aos 100 m da unidade de análise.

Em relação ao IRI e ao ATR, o VDR realiza leituras, por meio do perfilógrafo inercial a laser, sempre na faixa de tráfego mais solicitada. Assim, os valores foram consolidados para a menor UA, agregando o cálculo do PSI em função do IRI.



Mateus Aguiar Lima, Karina Soares da Costa e Oliveira, Vinicius Quintiliano Pereira, Leonardo Fabri de Moraes, Cintia Adriana Azevedo de Liz Anhaia, Régis Martins Rodrigues & Luiz Guilherme Rodrigues de Mello

Pela relevância para a DPP e o Plano Nacional de Manutenção Rodoviária (PNMR), foi mantido na base do SGP do DNIT o ICS que por definição do DNIT é dado pela pior condição entre o IRI e o IGG. No sistema, a Coordenação de Planejamento (COPLAN) do DNIT adotou as escalas de classificação conceitual desses índices de acordo com a Tabela 1, a seguir.

Tabela 1. Escala de classificação conceitual do IGG, IRI e ICS (DNIT).

IGG Índice de Gravidade Global	IRI International Roughness Index	ICS Índice da Condição da Superfície	Conceito
$0 \leq \text{IGG} \leq 20$	$0 \leq \text{IRI} \leq 2,5$	5	Ótimo
$20 < \text{IGG} \leq 40$	$2,5 < \text{IRI} \leq 3,5$	4	Bom
$40 < \text{IGG} \leq 80$	$3,5 < \text{IRI} \leq 4,5$	3	Regular
$80 < \text{IGG} \leq 160$	$4,5 < \text{IRI} \leq 6,0$	2	Ruim
$\text{IGG} > 160$	$\text{IRI} > 6,0$	1	Péssimo

As bacias de deflexão, contratualmente, foram levantadas a cada 200 metros, alternadamente, sempre na faixa mais solicitada. Assim, para cada 100 metros foi atribuído o dado da bacia deflectométrica imediatamente anterior. Os dados de tráfego também foram armazenados para a menor UA.

Quanto à estrutura do pavimento, nas lacunas existentes na rede viária identificadas na ferramenta *As Built*, adotou-se as informações de largura de faixa de rolamento de 3,5 m e de acostamento de 2,5 m. A identificação de ocorrência ou não de acostamentos é verificada a partir das marcações do LVC. Já as espessuras das camadas do pavimento genérico (*default*) considerado diferem de acordo com o tipo de pista. No caso de pistas simples, adotou-se 7 cm de revestimento asfáltico com CBUQ, 17 cm de camada de base composta por brita graduada simples e 20 cm de subbase com solo estabilizado; enquanto para pistas duplas, as espessuras foram de 12,5 cm, 20 cm e 30 cm, respectivamente. Em que pese a extensão da malha administrada pelo DNIT e a dificuldade de levantamento desse tipo de dado, o órgão está promovendo esforços no sentido de identificar a estrutura do pavimento nessas lacunas e atualizar a base de dados do SGP.

A partir das soluções de manutenção adotadas no SGP do DNIT foram formulados e introduzidos os preços unitários utilizados no sistema. Para tanto, considerou-se o escopo dos serviços que compõe cada uma dessas soluções e relacionou-se com o respectivo custo definido no SICRO. Foi utilizada a data-base de custos mais recente, o sistema atualiza o custo dos preços unitários para cada unidade da federação de forma automatizada.

4 ANÁLISES DO SGP

O ponto chave da remodelagem do SGP-DNIT consistiu na introdução dos módulos necessários para o diagnóstico consistente com base na deterioração esperada dos pavimentos detectada por modelos de previsão de desempenho que descrevem a interação tráfego-estrutura, da rede viária, com o intuito de gerar cenários de investimentos mais eficazes para a alocação de recursos orçamentários na manutenção rodoviária. Aqui, foi inserida a base técnica de engenharia de pavimentos, para alavancar as análises do sistema e conferir a consistência imprescindível para suporte à tomada de decisão, aliada a um ambiente de sistema *web* moderno, responsivo, intuitivo, prático e seguro, juntamente com capacidade de processamento no servidor do DNIT.



DOI: [10.29327/1430212.49-100](https://doi.org/10.29327/1430212.49-100)

REMODELAGEM E ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS DO DNIT (SGP-DNIT)

4.1 Retroanálise de bacias

Neste módulo, é preciso conhecer as camadas e espessuras do pavimento da rede avaliada. A interpretação das bacias visa obter os módulos de resiliência efetivos *in situ* das camadas do pavimento e o Número Estrutural (SN). Primeiramente, o sistema verifica se há inconsistência nos dados da bacia para corrigir, caso seja possível, ou descartá-la. Depois, corrige a temperatura para determinar esses módulos de resiliências, ajustar as espessuras das camadas do pavimento e, por fim, calcular o SN, a deflexão máxima e o fator de calibração para o Modelo de Resiliência da Brita Graduada.

4.2 Modelos de Previsão de Desempenho

Neste módulo, foram introduzidos modelos de previsão de desempenho consistentes, do PSI, do IRI, do SCI e do IGG, provenientes da fusão do Guia da AASHTO de 1993 com os modelos empíricos do HDM (*Highway Development and Management model*), junto com modelos mecanísticos-empíricos para previsão de trincamento por fadiga e de afundamentos nas trilhas de rodas (Modelo da Shell). Esses modelos são destinados à previsão do desempenho futuro dos pavimentos e ao dimensionamento da espessura da camada de recapeamento em concreto asfáltico para atendimento ao período de projeto. Foram estruturados em bases mecanístico-empíricas para tornar suas previsões compatíveis com as necessidades de intervenção que seriam detectadas por meio de projetos executivos. Estimam a vida restante (VR) do pavimento, a camada crítica e o índice que condiciona essa VR, prevendo a deterioração dos referidos índices de desempenho e calculando os seus fatores de calibração.

A interação tráfego-estrutura foi introduzida por meio das equações da AASHTO, enquanto o efeito da deterioração a longo prazo e a calibração para as rodovias brasileiras foram incorporados pelo HDM. Foram adicionadas técnicas de *machine learning* que possibilitam a recalibração desses modelos a partir dos próprios resultados de desempenho da rede.

4.3 Árvores de Decisão

Foram criadas árvores de decisão completas, que observam a deterioração da superfície e as deficiências funcionais e estruturais existentes no pavimento, capazes de estabelecer um diagnóstico preciso acerca da condição atual dos pavimentos e determinar as soluções de manutenção mais eficazes de modo a corrigir todos os problemas identificados. Destaca-se que as intervenções sugeridas em um sistema com visão de planejamento se estreitam à solução de projeto, mas não sugere a eliminação da etapa do projeto executivo.

O SGP-DNIT faz um diagnóstico detalhado do pavimento analisado, indica a necessidade atual de manutenção e calcula as espessuras de recapeamento e fresagem para atendimento ao período de projeto, observando a camada crítica da estrutura. A pergunta inicial da árvore é sobre a vida restante, se menor que a estipulada pelo usuário, indica-se restauração, senão, conservação. Para que as árvores apontem o melhor tipo de solução de cada um desses universos, são considerados os resultados dos módulos anteriores e parâmetros definidos em tela pelo usuário. Como soluções, por exemplo, têm-



se: conservação rotineira, leve e pesada; recapeamento simples ou com uso de concreto betuminoso modificado; aplicação de camada antirreflexão de trincas e recomposição do revestimento, parcial e total.

4.4 Simulação de Cenários de Investimentos

Este módulo gera planos plurianuais de investimentos em manutenção, com ou sem restrição orçamentária, ao longo do período de análise. Para a simulação de cenários, parte-se de uma ordem de priorização de trechos com base em um índice de prioridade (IP) formado por quatro componentes: conforto ao rolamento, deterioração da superfície, segurança e tráfego.

Inicialmente, o SGP-DNIT deteriorará em um ano os índices de desempenho a partir dos dados presentes na base em razão da defasagem entre o levantamento dos dados e o momento em que o plano de investimentos se iniciará. Com esses novos valores, o sistema acionará as árvores de decisão e identificará a solução proposta futura para calcular os quantitativos e custos associados do referido plano. Caso o usuário tenha forçado uma determinada solução para um trecho específico de um dado ano ou mais na análise, então, será considerada essa imposição em detrimento da solução indicada pela árvore de decisão.

Um recurso adicional deste módulo permite que o usuário otimize a priorização realizada e a forma de imposição das restrições. Assim, o método de priorização escolhido pelo usuário, considerado na simulação de cenários, poderá ser realizado selecionando toda a rede ou um Estado. Já a imposição das restrições poderá ser aplicada determinando as extensões anuais dos programas de manutenção aplicados pelo DNIT (Conservação, Revitaliza, CREMA e Restauração) ou observando o orçamento e os parâmetros de desempenho limites que podem ser variados, à critério do usuário, para cada ano da análise, possibilitando a realização de diversas estratégias.

O sistema compara esses cenários entre si para que o usuário acompanhe a evolução dos parâmetros de desempenho ao longo do período de análise e identifique aquele que apresenta a melhor relação benefício-custo. Os resultados dessa comparação auxiliam o usuário na identificação do melhor cenário em relação a outro, ambos tomando por base a solução de manutenção mínima.

5 RESULTADOS

Atualmente, o SGP-DNIT pode ser utilizado para consulta de dados de condição da malha, retroanálise de bacias de deflexão, identificação da camada crítica, cálculo da idade e respectiva vida restante do pavimento, diagnóstico da condição atual do pavimento, identificação das necessidades atuais de manutenção, simulação e comparação de cenários de investimento, por fim, geração de quantitativos de serviços e custos dos planos plurianuais de investimento. Os resultados que podem ser obtidos em cada um dos módulos do SGP-DNIT são descritos a seguir.

5.1 Consulta de Dados de Condição

No SGP-DNIT, o usuário pode consultar as proporções de malha viária classificadas em relação aos ICS, IRI e IGG (vide Figura 3). Os gráficos são responsivos ao filtro de seleção da rede que o usuário



DOI: 10.29327/1430212.49-100

REMODELAGEM E ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS DO DNIT (SGP-DNIT)

deseja consultar e estão divididos em grupos de Região, Unidade Federativa (UF), Rodovia e Ano de levantamento dos dados. No nível mais específico de consulta, Rodovia, o usuário pode verificar as estatísticas das ocorrências dos defeitos da rede e gráficos lineares com o acompanhamento da evolução dos índices no hodômetro crescente da rodovia analisada.



Figura 3. Tela de consulta de dados de condição do SGP/DNIT (2024).

5.2 Retroanálise de Bacias de Deflexão

São interpretadas as bacias de deflexões do FWD para obtenção dos módulos de resiliência efetivos *in situ* dos materiais das camadas do pavimento, junto com o Número Estrutural Efetivo da AASHTO por unidade de análise e por trecho de SNV. São corrigidas as espessuras das camadas dos pavimentos e calculados os fatores de calibração dos modelos de resiliência para a brita graduada, além dos fatores médios de calibração e dos desvios- padrão. A Figura 4, na sequência, apresenta a tela de um resultado da retroanálise da bacia.

Modelo Geral de Resiliência para Brita Graduada													Modelo da Shell				
Fc Médio		Desvio Padrão											Fc Médio		Desvio Padrão		
1.4007		0.4325											0.2558		0.2558		
MR (kgf/cm²) = fc x 152 x Theta (θ)⁰.6309 x Epsv (ε)⁻0.319													E2 = fc x 0,2 x [Hbase(mm)⁰.45] x Efund				
DOFID (32.81 MM)	SNPAV	SNREV	SNREVBASE	RC (M)	E1REF (KGF/CM²)	E1 (KGF/CM²)	E2 (KGF/CM²)	E3 (KGF/CM²)	ESL (KGF/CM²)	ETOPBASE (KGF/CM²)	ESBSL (KGF/CM²)	K _{SL} (KGF/CM²)	ENE_SL	JCR	ECCP (KGF/CM²)	KCP (KGF/CM²)	HREV (CM)
64.1300	3.0270	1.0370	1.665	133.3008	34122	14842	1314	2307	1263	1454.0000	1564	1175.751	-0.1922323	-1	-1	-1	7.4980
58.2200	3.0300	1.1170	1.726	154.4008	52706	23975	1556	2398	2343	1753.0000	1860	2297.621	-0.1518313	-1	-1	-1	7.2889
48.5300	3.0980	0.9870	1.737	156.6008	45916	21519	1997	2548	3085	2299.0000	2476	3070.159	-0.07692677	-1	-1	-1	6.7049
41.7900	3.3390	0.9610	1.828	179.0008	30114	14507	1973	3248	2404	2290.0000	2485	2333.523	-0.1151433	-1	-1	-1	7.4366
49.0200	2.9810	1.2440	1.614	143.0008	117666	54980	1610	2411	2172	1853.0000	2021	2120.625	-0.1055334	-1	-1	-1	5.9174
54.3300	2.8760	0.9050	1.585	116.9008	32211	15130	1900	1996	2127	1740.0000	1887	2128.956	-0.05035188	-1	-1	-1	6.7331
43.5300	2.9810	0.8940	1.48	138.7008	29183	14377	1856	2026	3141	2192.0000	2412	3165.953	0.02787837	-1	-1	-1	6.8079
53.0300	2.7470	0.8510	1.529	106.9008	26054	12469	1562	1849	2857	1894.0000	2242	2876.279	0.03348118	-1	-1	-1	6.7323
40.1300	3.0980	0.9300	1.663	143.5008	42955	20474	2167	2371	3795	2592.0000	2928	3818.378	0.02850549	-1	-1	-1	6.4524
39.7900	3.1020	0.9770	1.698	143.2008	41956	19161	2276	2791	3021	2523.0000	2676	3043.159	0.01035328	-1	-1	-1	6.6047
41.4000	3.1200	1.0340	1.834	166.4008	32950	15251	1870	1821	3259	2171.0000	2354	3358.415	0.06934159	-1	-1	-1	8.0917
44.9000	2.8670	0.8890	1.637	131.5008	32966	13816	1760	1695	3558	2085.0000	2294	3678.825	0.08510208	-1	-1	-1	6.5411

Figura 4. Exemplo da tela do SGP-DNIT com resultados da retroanálise de bacias deflectométricas.



Mateus Aguiar Lima, Karina Soares da Costa e Oliveira, Vinicius Quintiliano Pereira, Leonardo Fabri de Moraes, Cintia Adriana Azevedo de Liz Anhaia, Régis Martins Rodrigues & Luiz Guilherme Rodrigues de Mello

5.3 Recalibração de Modelos de Previsão de Desempenho

Como resultado é calculada a vida restante e recalibrados os modelos de previsão de desempenho, apresentando, para cada unidade de análise, os fatores de calibração do PSI, do SCI e do ATR. Além da síntese da recalibração e da vida restante para a rede avaliada. As Figuras 5 e 6, a seguir, ilustram, em tela, os resultados da recalibração dos modelos e a síntese dos fatores de calibração, além do cálculo da vida restante para um trecho de rede avaliada.

INÍCIO (KM)	FINAL (KM)	EXTENSÃO	FCSCI	FCPSI	FCATR	FCOCP	FCCOPSCI	FCCOPTR	FCDELTA/TR	SN CALIBRAÇÃO	MR CALIBRAÇÃO	Q10	CALIBROUATR	CAMADA CRITICA	VR_ANOS	CRITVR
297.2	298.2	1.000	0.441	2.303	2.135	-1	-1	-1	-1	4.037	23712.66	15	S	Subleito	0.00	IGG
297.2	298.2	1.000	0.740	0.442	1.689	-1	-1	-1	-1	3.424	14907.54	15	S	Subleito	0.00	IRI e IGG
298.2	299.2	1.000	0.465	2.260	2.671	-1	-1	-1	-1	3.863	30796.59	15	S	Subleito	0.00	IGG
298.2	299.2	1.000	0.403	0.435	1.835	-1	-1	-1	-1	3.618	16472.26	15	S	Subleito	0.00	IRI e IGG
299.2	299.4	0.200	0.544	0.564	1.000	-1	-1	-1	-1	2.317	57050.73	15	N	Sub-base	6.49	ATR
299.2	299.4	0.200	1.165	0.613	1.784	-1	-1	-1	-1	3.327	14694.17	15	S	Subleito	0.00	IRI e IGG
614.6	615.6	1.000	1.000	1.000	2.325	-1	-1	-1	-1	5.865	32916.07	15	S	Subleito	4.60	IGG
614.6	615.6	1.000	1.057	0.619	1.349	-1	-1	-1	-1	1.647	96586.06	15	S	Base	0.00	IGG
615.6	616.6	1.000	2.016	1.216	1.654	-1	-1	-1	-1	1.512	92863.92	15	S	Base	0.20	IGG
615.6	616.6	1.000	0.646	0.334	1.282	-1	-1	-1	-1	1.661	116609.8	15	S	Base	0.00	IRI e IGG
616.6	617	0.400	1.774	1.027	1.190	-1	-1	-1	-1	1.56	80218.12	15	S	Base	0.00	IRI e IGG
616.6	617	0.400	1.000	1.000	1.552	-1	-1	-1	-1	6.134	44807.96	15	S	Subleito	1.00	IRI

Figura 5. Exemplo da tela do SGP-DNIT com resultados da recalibração dos modelos por UA.



Figura 6. Exemplo da tela do SGP-DNIT com a síntese da recalibração dos modelos e cálculo da VR.

5.4 Diagnóstico e Necessidades Atuais de Manutenção

Esse módulo apresenta o diagnóstico e as indicações das necessidades atuais de manutenção para cada unidade de análise, por faixa de tráfego e por trecho de SNV da rede avaliada. Além de arquivos com os quantitativos de serviços e custos associados para o acostamento e a pista de rolamento. A Figura 7, na sequência, apresenta a tela de um resultado de diagnóstico e identificação de necessidade atual de manutenção.



DOI: 10.29327/1430212.49-100

REMODELAGEM E ATUALIZAÇÃO DO SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS DO DNIT (SGP-DNIT)

VIDA RESTANTE	CRITÉRIO DA VIDA RESÍDUO	CAMADA CRÍTICA	DIAGNÓSTICO	MEDIDA	CONSERVA PÉSSIMA	ESPESSURA DE PRELIMBRI	ESPESSURA DE REVESTIMENTO	DEFLEÇÃO	ACOSTAMENTO LADO ESQUERDO	ESPESSURA DE REVESTIMENTO LADO ESQUERDO	ESPESSURA DE PRELIMBRI LADO ESQUERDO	FAIXA 1	ESPESSURA DE REVESTIMENTO NA FAIXA 1
0.00	IRI	Sub-base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada. Freagem precisa após abertura devido a irregularidade excessiva.	FB+CBUQ		3	11	29	TST	3	0	FB+CBUQ	3
0.00	IRI	Sub-base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada.	CBUQ		0	10	29.01	PMF	5	0	CBUQ	0
0.00	IRI	Sub-base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada.	CBUQ		0	13.5	20.4	PMF	8.5	0	CBUQ	0
0.00	IRI	Sub-base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada.	CBUQ		0	13	18.88	PMF	8	0	CBUQ	0
0.00	IRI	Sub-base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada.	CBUQ		0	5	37.66		0	0	CBUQ	0
0.00	IRI	Sub-base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada.	CBUQ		0	12.5	23.4	PMF	7.5	0	CBUQ	0
0.60	IRI	Sub-base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada.	CBUQ		0	13.5	18.61	PMF	8.5	0	CBUQ	0
2.30	IRI	Sub-base	Pavimento em condições regulares. Excede vida restante e Conservação Passada não é necessária.	CL		0	0	53		0	0	CL	0
0.00	IRI	Sub-base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada.	CBUQ		0	13.5	17.88	PMF	8.5	0	CBUQ	0
0.00	IRI	Sub-base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada.	CBUQ		0	13.5	17.75	PMF	8.5	0	CBUQ	0
0.00	IRI	Sub-base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada.	CBUQ		0	13.5	18.28	PMF	8.5	0	CBUQ	0
0.00	IRI	Sub-base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada.	CBUQ		0	13.5	19.34	PMF	8.5	0	CBUQ	0
0.30	IRI	Base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada.	CBUQ		0	4.5	31.4		0	0	CBUQ	0
0.00	IRI	Base	Pavimento deve ser restaurado, pois a vida restante está abaixo da mínima admissível. Pavimento tem deficiência estrutural moderada.	CBUQ		0	4.5	32.28		0	0	CBUQ	0

Figura 7. Exemplo da tela do SGP-DNIT com resultados de diagnóstico e necessidades atuais de manutenção.

5.5 Planos Plurianuais de Investimento

Por fim, no último módulo do SGP-DNIT, são gerados os planos plurianuais de investimentos com os quantitativos de serviços e custos para acostamentos e faixa de rolamento, para cada ano do período de análise, por unidade de análise e trechos de SNV da rede analisada. Além da previsão de desempenho futuro dos pavimentos e a síntese da estratégia gerada em termos de custos e benefícios.

Na simulação demonstrada na Figura 7, a seguir, a rede analisada não apresenta melhoria na condição da superfície nos anos 2024 e 2025 em decorrência da restrição orçamentária imposta.

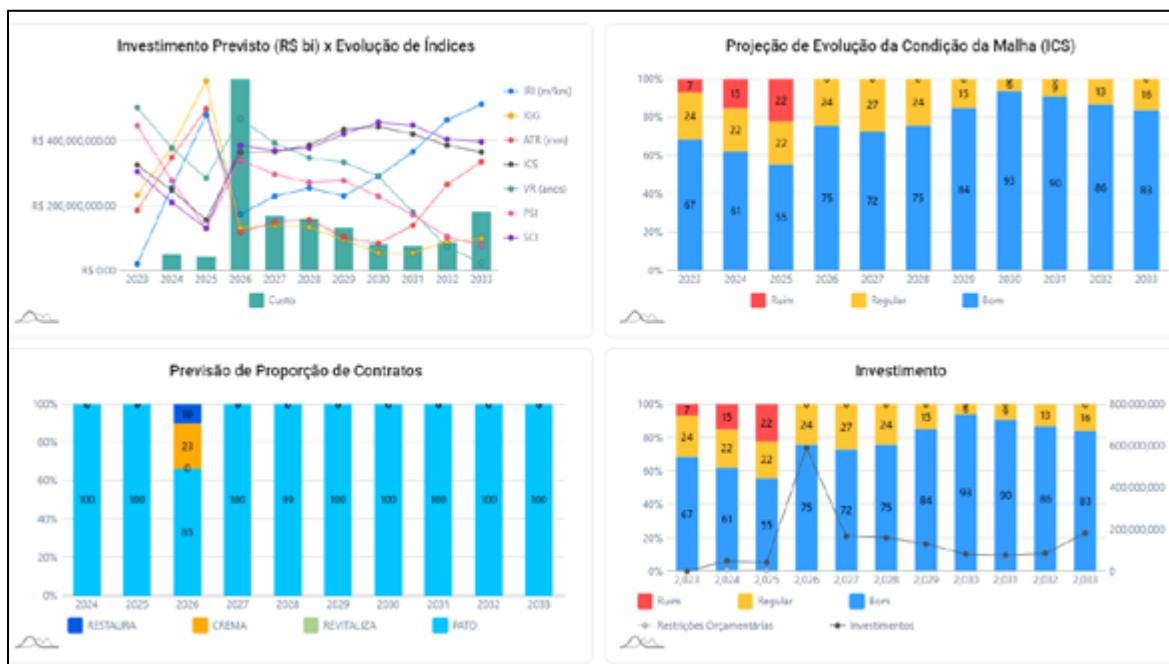


Figura 6. Exemplo da tela do SGP-DNIT com resultados de plano plurianual de investimentos.



6 CONCLUSÃO

A remodelagem, realizada entre 2022 e 2024, trouxe atualização, modernização e consistência para o SGP-DNIT pautada em conceitos e metodologia mecânica de engenharia de pavimentos alinhada às melhores práticas adotadas na gerência de pavimentos no âmbito mundial. Atualmente, o DNIT possui um sistema completo e operacional que atende perfeitamente às demandas do cenário brasileiro submetidas à autarquia em relação aos *softwares* existentes no mercado.

Na atualidade, o órgão está evidenciando evolução significativa na melhoria da avaliação da condição da malha rodoviária federal sob sua responsabilidade, na detecção das necessidades atuais de manutenção a partir do PSI, do IRI, do SCI, do IGG, do ATR e do trincamento, na previsão de desempenho dos pavimentos e na geração e comparação de cenários de investimentos de planos plurianuais para manutenção rodoviária.

Percebe-se que a remodelagem atendeu o fundamento primordial de um SGP que é dar suporte à tomada de decisão dos gestores, visto que assegura consistência técnica nas avaliações e decisões, aumenta a eficiência do processo de decisão e fornece respostas acerca das consequências de cada estratégia. No entanto, pelo sistema ter sido entregue em março de 2024, os usuários estão identificando possíveis melhorias e sugestões relativas à interface, às análises e à usabilidade do sistema. Assim, um novo trabalho pode abordar, por exemplo, o estudo de um trecho específico e discutir as limitações observadas, dentre elas, o impacto da adoção de uma estrutura de pavimento em face das lacunas encontradas.

Essa atualização traz a oportunidade de aperfeiçoamento dos processos de gerenciamento de dados e dos normativos do órgão, sejam eles voltados para o levantamento de dados e metodologias de soluções de manutenção ou para a concepção do Plano Nacional de Manutenção Rodoviária (PNMR). Ademais, impulsiona o órgão a buscar atingir a máxima eficácia nos investimentos, evoluindo da manutenção corretiva para a manutenção preventiva, para propiciar uma rede viária segura, econômica e confortável para a sociedade.

7 REFERÊNCIAS

- AASHTO (2012). The AASHTO Pavement Management Guide. Second Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- DNIT (2006). Brasil. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR 720. Manual de restauração de pavimentos asfálticos. - Rio de Janeiro.
- DNIT (2011). Brasil. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR 745. Manual de gerência de pavimentos. - Rio de Janeiro.
- DNIT (sem data). Índice de Condição da Superfície. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria/ndicedaCondiodaSuperficie.pdf>.
- RODRIGUES, R. M. (2020). Engenharia de Pavimentos, Partes 1 e 2, Porto Alegre – RS, Brasil.
- SHAIN, M. Y. e WALTHER, J. (1990). *Pavement Maintenance Management for Roads and Streets Using the PAVER System*. CERL-TR-M-90/05. US Army. USA.



PROPOSTA DE PARÂMETROS DE PAVIMENTAÇÃO PARA RODOVIAS FEDERAIS CONCEDIDAS: ESTUDO E FUNDAMENTAÇÃO

Thiago Douglas Alvarenga Camelo¹; Arilena Covalesky Dias¹; Laynara Xavier Barroso¹

RESUMO

As rodovias brasileiras desempenham um papel crucial na logística do país, porém enfrentam desafios significativos de infraestrutura. Uma parcela considerável das rodovias federais apresenta problemas de pavimentação, impactando negativamente a economia e o transporte. No mesmo sentido, observa-se que as rodovias concedidas, quando comparadas às rodovias sob gestão pública, apresentam um melhor desempenho. Nesse contexto, cabe ao poder público, enquanto agente regulador, garantir uma gestão eficiente, aderente às necessidades da sociedade. Todavia, para que isso ocorra, é necessário que os parâmetros de desempenho de pavimentos estejam adequados tanto tecnicamente quanto em conformidade com as boas práticas regulatórias, de modo a desonerar os contratos e aumentar a eficiência da gestão contratual. Assim, o presente estudo teve como principal objetivo apresentar uma proposta de revisão dos parâmetros de pavimentação, visando à simplificação e padronização dos mesmos, de forma a atender às necessidades atuais das concessões rodoviárias, em conformidade com os padrões de eficiência, segurança, conforto e modicidade tarifária. Para a revisão proposta, foram avaliados a pertinência da manutenção ou supressão do parâmetro, os valores limites por fases de concessão, a periodicidade de monitoração, os métodos de cálculo e avaliação em campo. Dessa forma, a proposta de revisão resultou na redução de 22 parâmetros, previstos no Programa de Exploração da Rodovia (PER) utilizado como referência, para 8 parâmetros finais distribuídos nas fases de trabalhos iniciais, recuperação e manutenção, abrangendo critérios de avaliação da condição funcional, estrutural e operacional do pavimento, tais como Índice de Irregularidade Longitudinal, Área trincada, Deflexão Admissível e *International Friction Index* (IFI).

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação; Rodovias; Concessões; Parâmetros de Pavimento; Regulação.

ABSTRACT

Brazilian highways play a crucial role in the country's logistics but face significant infrastructure challenges. A considerable portion of federal highways suffers from pavement issues, negatively impacting the economy and transportation. In the same way, it is observed that concession highways, when compared to publicly managed highways, perform better. In this context, it is the responsibility of public authorities, as regulatory agents, to ensure efficient management that meets societal needs. However, for this to happen, pavement performance parameters must be both technically appropriate and in line with regulatory best practices to ease contract burdens and enhance contractual management efficiency. Therefore, the main objective of this study was to present a proposal to revise the paving parameters, with a view to simplifying and standardizing them, in order to meet the current needs of road concessions, in compliance with efficiency, safety, comfort and tariff modicity standards. For the proposed revision, the relevance of maintaining or suppressing parameters, limit values per concession phase, monitoring frequency, and field calculation and evaluation methods were assessed. Consequently, the proposed revision reduced the 22 parameters outlined in the *Programa de Exploração Rodoviária* (PER) used as a reference to 8 final parameters distributed across the initial works, recovery, and maintenance phases, encompassing criteria for evaluating the functional, structural, and operational condition of the pavement, such as the International Roughness Index (IRI), Cracked Area, Allowable Deflection, and International Friction Index (IFI).

KEY WORDS: Pavement; Highways; Concessions; Pavement parameters; Regulation.

¹ Agência Nacional de Transportes Terrestres, thiago.alvarenga@antt.gov.br, arilena.dias@antt.gov.br; laynara.barroso@antt.gov.br;



INTRODUÇÃO

As rodovias brasileiras desempenham um papel essencial na logística do país, conectando todas as regiões por meio de uma extensa malha rodoviária. Segundo a Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2023), o transporte rodoviário continua sendo o modal de maior expressão na matriz brasileira, respondendo por mais de 65% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros. Avaliações realizadas pela CNT em 2023 revelaram que 56,8% dos 111.502 km de rodovias federais avaliadas apresentaram problemas no pavimento, sendo que 34,2% foram classificadas como regulares, 16,8% como ruins e 5,8% em péssimo estado (CNT, 2023). É fundamental destacar que defeitos na superfície dos pavimentos podem gerar impactos adversos tanto no setor de transporte quanto na economia em geral. Esses problemas resultam em custos elevados de manutenção de veículos, maior consumo de combustível e, conseqüentemente, aumento nos custos de frete e tarifas. Tal cenário ressalta a importância de uma gestão eficiente do pavimento rodoviário.

Além disso, a pesquisa realizada pela Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2023) revelou que, ao comparar a qualidade dos pavimentos entre diferentes tipos de gestão — concedida e pública — as rodovias sob gestão concedida apresentaram um maior percentual de trechos classificados como “Ótimo” ou “Bom” em comparação às rodovias federais sob gestão pública, com índices de 67,0% e 36,0%, respectivamente. Conforme destacado na pesquisa, o melhor desempenho das rodovias federais concedidas é atribuído aos maiores investimentos por quilômetro de rodovia, bem como à maior eficiência e menor burocracia desse tipo de gestão.

No cenário das rodovias federais concedidas, conforme instituído pela Lei nº 10.233/2001, cabe à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) realizar a gestão e fiscalização dos contratos de concessão. Os contratos de concessão estabelecem parâmetros de desempenho para garantir a qualidade e a durabilidade adequada do pavimento ao longo de toda a vigência do contrato. Os referidos parâmetros são compostos por critérios de avaliação da condição funcional, estrutural e operacional do pavimento, tais como: Área Trincada, Deflexão Característica e/ou Admissível, Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI), Flechas nas Trilhas de Roda, entre outros. Esses parâmetros desempenham um papel crucial no alcance dos objetivos e diretrizes estabelecidos nos contratos, por meio dos quais o pavimento é submetido a avaliações periódicas pela agência reguladora, por meio de fiscalização e monitoramento do pavimento, resultando na aplicação de penalidades e descontos para recomposição do equilíbrio econômico-financeiro em caso de descumprimento.

No entanto, para garantir a eficiência na prestação de serviços aos usuários, é crucial que os parâmetros de pavimentação estejam adequados tanto em termos técnicos quanto regulatórios. Isso visa assegurar a manutenção adequada da qualidade das vias, evitando descumprimentos recorrentes por parte dos agentes regulados, que poderiam resultar em penalidades e descontos excessivos, afetando a execução contratual a longo prazo. Diante disso, em conformidade com a reforma regulatória introduzida pela Lei Geral das Agências Reguladoras (Lei nº 13.848/2019), é imperativo que a agência reguladora adote boas práticas regulatórias, que implique em uma gestão mais eficaz do ponto de vista da fiscalização e na busca por inovação para atender às novas demandas da sociedade. Isso inclui a revisão de processos e regulamentos, visando simplificá-los e promover uma regulação que resulte em custos regulatórios mais baixos tanto para os usuários quanto para os agentes envolvidos. Logo, a ANTT vem buscando atuar na inovação e desburocratização do processo regulatório, implementando a Revisão do Estoque Regulatório e a Política de Redução do Fardo Regulatório, com objetivo de diminuir o impacto financeiro sobre os agentes econômicos e os usuários (ANTT, 2024a).



DOI: [10.29327/1430212.49-98](https://doi.org/10.29327/1430212.49-98)

PROPOSTA DE PARÂMETROS DE PAVIMENTAÇÃO PARA RODOVIAS FEDERAIS CONCEDIDAS: ESTUDO E FUNDAMENTAÇÃO

Nesse contexto, o objetivo principal deste estudo de caso foi apresentar uma proposta de revisão dos parâmetros de pavimentação para os contratos de concessão, buscando simplificá-los e padronizá-los para as diferentes etapas: trabalhos iniciais, recuperação e manutenção, assegurando a conformidade com padrões de eficiência, segurança, conforto e modicidade tarifária.

ESTUDO DE CASO

O Programa de Concessão de Rodovias Federais (PROCROFE) foi criado em 1993, por meio da Portaria Federal n.º 10/1993 do Ministério dos Transportes, com a primeira licitação ocorrendo no ano seguinte. As licitações do PROCROFE foram divididas em 4 etapas de concessões. A primeira etapa inclui cinco contratos, iniciados entre 1995 e 1997, com prazos variando de 20 a 25 anos. A segunda fase, realizada entre 2007 e 2008, envolveu oito contratos, os quais passaram a incluir obras de expansão de capacidade. A terceira fase teve lugar entre 2013 e 2014, durante a qual foram conduzidas oito licitações. A quarta fase teve início em 2018 e até o momento inclui sete contratos estabelecidos (ESTEVES, 2023).

No contexto das rodovias federais concedidas, o documento responsável por definir as metas, critérios, requisitos, intervenções obrigatórias, diretrizes técnicas e prazos, anexo Contrato de Concessão de infraestrutura Rodoviária, é o denominado Programa de Exploração da Rodovia (PER). Ele abrange quatro Frentes de serviços, que são: Recuperação e Manutenção, Ampliação de Capacidade, Melhorias e Manutenção de Nível de Serviço, Conservação e Serviços Operacionais (ANTT, 2024b).

No que diz respeito ao atendimento dos parâmetros de pavimentos, destacam-se as diretrizes previstas na Frente de Recuperação e Manutenção, que se divide em três etapas importantes, a saber: Trabalhos Iniciais, Recuperação e Manutenção. A fase de Trabalhos Iniciais consiste na etapa de execução de obras e serviços pela Concessionária logo após a Data da Assunção. A fase de Recuperação refere-se à etapa subsequente à conclusão dos trabalhos iniciais e tem como objetivo o conjunto de obras e serviços, incluindo melhorias funcionais e operacionais, bem como as intervenções de natureza estrutural no pavimento e nos demais elementos do Sistema Rodoviário. A recuperação da rodovia deve ser executada de forma gradual, atendendo aos Parâmetros de Desempenho previstos. Por sua vez, a fase de Manutenção refere-se ao conjunto de obras e serviços destinados à recomposição e ao aprimoramento das características técnicas e operacionais do Sistema Rodoviário. Essa fase se estende desde o final da fase de recuperação até o término da Concessão (ANTT, 2024b).

Além disso, outro marco importante do contrato diz respeito ao termo contratual, o qual também pode estar associado a parâmetros de desempenho também pré-definidos no PER, no qual é prevista a reversão dos bens à União. Assim, os parâmetros de desempenho nesse momento são utilizados como forma de garantir a integridade dos ativos quando da reversão, bem como serem utilizados para o cálculo de eventuais indenizações em caso de inobservância aos valores limites, conforme previsto na Lei nº 8.987/1995, conhecida como Lei das Concessões.

As fases das concessões são definidas por marcos temporais previamente estabelecidos em contrato, como indicado na primeira linha da Tabela 1. A cada fase da concessão, são definidos parâmetros de desempenho para o pavimento, os quais se tornam mais rígidos à medida que se avança da etapa de trabalhos iniciais para a recuperação e manutenção. Em conformidade com os prazos contratuais, tanto a concessionária quanto as empresas supervisoras contratadas pela ANTT devem realizar a medição desses parâmetros no campo. Os relatórios resultantes dessas avaliações, preparados pelas empresas supervisoras, são utilizados para embasar a fiscalização das obrigações contratuais das concessionárias, sujeitos à validação pelas áreas competentes da ANTT. Com base nos resultados



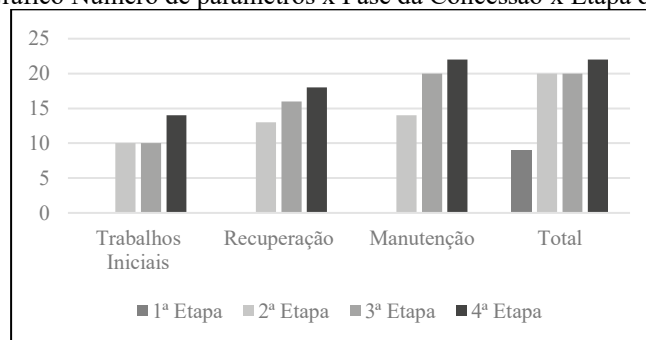
Thiago Douglas Alvarenga Camelo,
Arlena Covalesky Dias,
Laynara Xavier Barroso

apresentados, é elaborado um parecer para fundamentar a possível emissão de um Auto de Infração (AI) em caso de descumprimento dos parâmetros de desempenho (ANTT, 2016). Adicionalmente, em alguns contratos, o descumprimento de parâmetros de desempenho previamente definidos pode acarretar a aplicação de fatores de desconto de reequilíbrio sobre a tarifa de pedágio.

A esse respeito, foi observado nos contratos de concessões rodoviárias a presença de um excessivo número de parâmetros de desempenho para o pavimento ao longo dos Contratos de Concessão de diferentes Etapas do Programa de Concessões de Rodovias Federais – PROCROFE. Estas exigências, aliadas às inconsistências de cunho técnicos, corroboram para aumento dos custos regulatórios, seja para as agências reguladoras, seja para os agentes regulados, sem observância de representativos benefícios aos usuários do ponto de vista conforto e segurança viária.

Para melhor ilustrar, a Figura 1 apresenta, por fase de concessão, o número de parâmetros de alguns contratos selecionados como exemplos: Edital de Concessão nº 0294/93-00 (1ª Etapa); Edital de Concessão nº 003/2007 (2ª Etapa); Edital de Concessão nº 004/2013 (3ª Etapa); e Edital de Concessão nº 03/2021 (4ª Etapa):

Figura 1. Gráfico Número de parâmetros x Fase da Concessão x Etapa de Concessão.



Nos contratos utilizados como referência no comparativo acima, foi observado um aumento significativo no número de parâmetros avaliados. Em termos gerais, os parâmetros passaram de 9 na 1ª etapa para 22 na 4ª etapa. Esse aumento é especialmente notável na fase de trabalhos iniciais, considerada crítica para a Concessão. Nessa fase, é essencial avaliar cuidadosamente a melhor alocação de recursos, pois todos os parâmetros devem ser atendidos antes do início da cobrança de pedágio. Portanto, um excesso de parâmetros nessa etapa pode provocar desequilíbrios econômicos significativos no contrato, comprometendo todo o projeto.

Sob esse aspecto, é ainda necessário mencionar que, além das diferenças entre os contratos das diversas etapas de concessão, observou-se também uma variação nos parâmetros e nos respectivos limites exigidos dentro dos contratos de uma mesma etapa de concessão. Tal fato implica em maior dificuldade na gestão dos contratos e na atuação das equipes de fiscalização.

Nesse sentido, o presente estudo para apresentação de proposta e simplificação dos parâmetros de pavimento foi iniciado e tomou como referência os parâmetros previstos no Programa de Exploração Rodoviária (PER) previsto no Contrato de Concessão Edital nº 03/2021 (ANTT, 2021), referente a exploração do Sistema Rodoviário composto pelas BR-116/101/RJ/SP, concedido a Concessionária Do Sistema Rodoviário Rio – São Paulo S.A., contemplado na 4ª etapa de concessões, doravante denominado como PER referência. Considerando as fases de trabalhos iniciais, recuperação e manutenção, o PER referência prevê 22 parâmetros de desempenho para o pavimento, conforme apresentado na Tabela 1, abaixo:



DOI: 10.29327/1430212.49-98

PROPOSTA DE PARÂMETROS DE PAVIMENTAÇÃO PARA RODOVIAS FEDERAIS CONCEDIDAS:
ESTUDO E FUNDAMENTAÇÃO

Tabela 1. Parâmetros de Pavimento - Contrato de Edital de Concessão nº 03/2021 BR-116/101/RJ/SP (ANTT, 2021).

Item	Parâmetros de desempenho	9 meses	12 meses	2º ano	3º ano	4º ano	5º ano	6º ao 30º ano	Recebimento
1	Ausência de áreas exsudadas superiores a 1 m²:		x						
2	Ausência total de flechas nas trilhas de roda, medidas sob corda de 1,2 m, superiores a:		10 mm		7 mm		5mm		
3	Porcentagem de Área Trincada Total (ATT) (avaliado em segmentos de 20 km)		10% área total	10% em 60% da rodovia 7% em 40% da rodovia	10% em 40% da rodovia 7% em 60% da rodovia	10% em 20% da rodovia 7% em 80% da rodovia	7% da rodovia	7% da rodovia	
4	Porcentagem: Dentro da Área Trincada Total (ATT), de trincas FC2 + FC3 (avaliado em segmentos de 20 km)		< 20% da (ATT)				<10% da (ATT)	<10% da (ATT)	
5	Ausência de área afetada por trincas interligadas - FC3						x	x	
6	Desnível entre a faixa de tráfego e os acostamentos (externo ou interno) (tolerância máxima)		5 cm				Ausência Total	Ausência Total	
7	Ausência de desnível entre as faixas de tráfego paralelas	x							
8	Irregularidade Longitudinal Máxima - IRI		3,5 m/km em 100%	3,50 m/km em 60% da rodovia; 2,70 m/km em 40% da rodovia	3,50 m/km em 40% da rodovia; 2,70 m/km em 60% da rodovia	3,50 m/km em 20% da rodovia; 2,70 m/km em 80% da rodovia	2,70 m/km em 100% da rodovia	2,70 m/km em 100% da rodovia	
9	Ausência de defeitos de alçamento de placa, fissura de canto, placa dividida (rompida), escalonamento ou degrau, placa bailarina, quebras localizadas ou passagem de nível com grau de severidade classificado como alto	x							
10	ICP - Ausência de amostras inferiores a:		55	55 em 60% das amostras 70 em 40% das amostras	55 em 40% das amostras 70 em 60% das amostras	55 em 20% das amostras 70 em 80% das amostras	70 em 100% das amostras	70 em 100% das amostras	
11	Ausência de juntas e trincas sem selagem para pavimentos rígidos, depressões, abaulamentos, painelas, ou ainda defeitos que caracterizem problemas de segurança ao usuário	x							
12	Largura mínima das pistas de rolamento de acordo com o especificado nas normas para o projeto geométrico de rodovias rurais do DNIT, com exceção dos trechos com previsão de obras de melhorias e/ou ampliação de capacidade/duplicações						x	x	



Thiago Douglas Alvarenga Camelo,
Arilena Covalesky Dias,
Laynara Xavier Barroso

Item	Parâmetros de desempenho	9 meses	12 meses	2º ano	3º ano	4º ano	5º ano	6º ao 30º ano	Recebimento
13	Deflexão característica (Dc) máxima de 50×10^{-2} mm						x	x	
14	Deflexão de pavimentos flexíveis ou semirrígidos (Do)								< que a deflexão admissível (Dam*) obtida para um horizonte de 5 anos
15	Índice de Gravidade Global (IGG) máximo:		40	40 em 60% da rodovia; 30 em 40% da rodovia	40 em 40% da rodovia; 30 em 60% da rodovia	40 em 20% da rodovia; 30 em 80% da rodovia	30 em toda a rodovia		≤ 20 em 100% da rodovia
16	Altura de areia (HS), mínima: 0,6 mm < HS < 1,2 mm		HS > 0,5 mm				x	x	
17	Valor de resistência à derrapagem: VRD > 47						x	x	
18	Ausência de áreas excessivamente remendadas na proporção máxima de 20 reparos a cada 1 km e 4 reparos a cada 100 mts						x	x	
19	Os segmentos homogêneos devem atender simultaneamente condições de tráfego, estrutura do pavimento e respostas de natureza estrutural e funcional, com extensões de até 10 km, justificadas pelo método das diferenças acumuladas da AASHTO						x	x	
20	SIGACO Fase 1 Elaborar o Plano de Gerenciamento de Pavimentos, no âmbito do Plano de Gestão de Ativos.	x							
21	SIGACO Fase 2 Realizar o Inventário Inicial do Sistema de Gerenciamento de Pavimento (SGP).		x						
22	SIGACO Fase 3 Implantar as demais ferramentas do Sistema de Gerenciamento de Pavimento (SGP).			x					

O estudo de caso buscou avaliar inconsistências técnicas e duplicidades nos parâmetros das concessões rodoviárias, que dificultam o cumprimento pelas concessionárias e podem resultar em penalizações duplas, violando o princípio *Non Bis In Idem*. Exemplos incluem a avaliação das flechas nas trilhas de roda e área trincada, ambos contemplados no Índice de Gravidade Global (IGG). Observou-se também que algumas metodologias de avaliação de campo pré-definidas estão desatualizadas, como é o caso do normativo DNIT PRO 007/2003 (DNIT, 2003), que utiliza inspeções visuais em detrimento de equipamentos mais modernos.

Assim, o estudo busca simplificar e padronizar os parâmetros, considerando sua pertinência, adequação, métodos de avaliação e periodicidade de monitoramento, visando uma fiscalização eficiente e alinhada com a segurança viária.



DOI: 10.29327/1430212.49-98

PROPOSTA DE PARÂMETROS DE PAVIMENTAÇÃO PARA RODOVIAS FEDERAIS CONCEDIDAS:
ESTUDO E FUNDAMENTAÇÃO

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após tratativas com as diversas partes interessadas e consultas à estudos e normativos técnicos, o trabalho realizado resultou na proposta contendo 8 parâmetros, apresentada nas Tabela 2 e Tabela 3:

Tabela 2. Proposta Final de Parâmetros de Desempenho de Pavimento – Frentes de Recuperação e Manutenção.

It e m	Parâmetros de Desempenho	Aplicabilidade		Pista	Trabalhos Iniciais		Recuperação		Manutenção	Recebimento Final da Concessão	Periodicidade de	
		Rígido	Flexível		12 meses	2º ano	3º ano	5º ano	6º ao 30º ano		Mínima	
1	Flechas nas trilhas de roda, medidas com equipamento a laser.		x	Principal	12 mm			7 mm	7 mm		Anual	
				Marginal	12 mm			12 mm	12 mm			
2	Percentual de trincas FC-2+FC-3 – avaliada em segmentos de 1 km		x	Principal	20% da área do seg. 1km			15% da área do seg. 1km	15% da área do seg. 1km		Anual	
				Marginal								
3	Desnível entre a faixa de tráfego e os acostamentos (externo e interno) (tolerância máxima)	x	x	Principal		5cm*					Anual	
				Marginal								
4	Ausência de desnível entre faixas de tráfego paralelas	x	x	Faixas de tráfego paralelas	x						Anual	
5	Irregularidade Longitudinal Máxima – IRI	x	x	Principal	3,5 m/km		2,7 m/km em 60% da rodovia	2,7 m/km	2,7 m/km		Anual	
				Marginal	3,5 m/km		3,0 m/km em 60% da rodovia	3,0 m/km	3,0 m/km			
6	ICP – Ausência de amostras inferiores a:	x		Principal	55		70 em 60% das amostras	70 em 100% das amostras	70 em 100% das amostras	70 em 100% das amostras		Anual
				Marginal								
7	Deflexão inferior à Deflexão Admissível (Dadm) determinada em função do VDMc**		x	Principal				Avaliação Quinquenal ***	x		Quinquenal	
				Marginal								
8	IFI (International Friction Index)	x	x	Principal	0,13			0,2	0,2		Anual	
				Marginal								

*Para as obras de ampliação de capacidade indica-se a ausência de desnível entre pista e acostamento, com tolerância máxima de 1,2 cm nas leituras individuais.

** Para as marginais e pistas principais, os valores de deflexão Característica (Dc) máxima do pavimento deverão respeitar os limites de deflexão admissível máximo apresentados na Tabela 3, a seguir, estabelecidos em função do volume de veículos para horizonte de 5 anos.

*** Avaliação no 5º ano que antecede o advento do termo contratual.

Tabela 3. Deflexões admissíveis em função do VDM comercial (VDMc).

VDM comercial, faixa de rolamento em análise (unidirecional)			D _{adm} (0,01 mm)
0	500	6,00E+06	70
500	1000	1,20E+07	60
1000	2500	3,00E+07	50
2500	5000	6,00E+07	45
5000	10700	1,30E+08	40



Thiago Douglas Alvarenga Camelo,
Arilena Covalesky Dias,
Laynara Xavier Barroso

Na Tabela 2, os valores apresentados são referenciais para segmentos homogêneos de 1 km de extensão. No entanto, ressalta-se que a proposta também inclui a avaliação de valores limites em segmentos individuais de 200 metros. Tal segmentação foi proposta com o objetivo de garantir um tratamento mais preciso dos dados de monitoração e evitar a concentração de defeitos em pequenas áreas dentro do segmento homogêneo de 1km. A Tabela 3, complementar à Tabela 2, apresenta os valores das faixas de Deflexão Admissível em função do Volume Médio Diário de veículos comerciais (VDMc).

Já na Tabela 4, são apresentados de forma concisa os equipamentos e as áreas de avaliação para cada parâmetro.

Tabela 4. Equipamentos a serem adotados e área a ser avaliada.

Item	Parâmetro	Equipamento a ser utilizado	Área a ser levantada
1	Flechas nas trilhas de roda, medidas com equipamento a laser.	Perfilômetro a Laser ou equipamentos similares.	Contínuo, em 100% da extensão, consolidada em segmentos de 200 metros.
2	Percentual de trincas FC-2+FC-3 - avaliada em segmentos de 1 km	Equipamento a laser similar	Contínuo, em 100% da extensão, consolidada em segmentos de 1km
3	Desnível entre a faixa de tráfego e os acostamentos (externo e interno) (tolerância máxima)	Equipamento de varredura a laser.	Contínuo, em 100% da extensão
4	Ausência de desnível entre faixas de tráfego paralelas	Equipamento de varredura a laser ou inspeção visual.	Contínuo, em 100% da extensão
5	Irregularidade Longitudinal Máxima - IRI	Perfilômetro a Laser ou equipamentos similares.	Contínuo, em 100% da extensão, consolidada em segmentos de 200m, de pavimento rígido e flexível.
6	ICP - Ausência de amostras inferiores a:	Equipamento à laser, levantamento visual ou por meio de equipamentos de vídeo registro.	Contínuo, em 100% da extensão, excetuando-se Praças de Pedágio, PPD's e balanças.
7	Deflexão inferior à Deflexão Admissível (Dadm) determinada em função do VDMc**	<i>Falling Weight Deflectometer</i> - FWD ou metodologia a qual possui correlações comprovadas com os resultados obtidos pelo FWD.	Espaçamento de 200m na mesma faixa de tráfego e alternado em 100m na faixa mais carregada (caso haja), com exceção das alças, dispositivos e acostamentos.
8	IFI (International Friction Index)	Preferencialmente, utilização <i>Grip Tester</i> ou outros equipamentos da norma ASTM E-1960 (2001) e, alternativamente, Pêndulo Britânico. Equipamento a laser, para obtenção do MPD, e, alternativamente, ensaio de Mancha de Areia.	Contínuo, em 100% da extensão, consolidada em segmentos de 200m.

Ao comparar com o PER referência, a presente proposta apresenta algumas modificações nos parâmetros a serem avaliados. Destacam-se as principais alterações promovidas:

- Supressão do parâmetro de Índice de Gravidade Global (IGG): Entendeu-se que o referido parâmetro, além de não representar a realidade da condição da superfície do pavimento, uma vez que é avaliado em uma área aproximada de apenas 15% da pista de rolamento, é obtido a partir da ponderação de diversos defeitos que já se encontram contemplados por outros parâmetros individuais, tais como flechas nas trilhas de roda e área trincada, incorrendo em duplicidade de avaliação e possíveis aplicações de penalidades. Assim, entende-se que os demais parâmetros por si só são capazes de demonstrar o desempenho do pavimento de forma mais representativa da realidade do trecho, justificando a supressão do parâmetro de IGG.
- Supressão dos parâmetros de defeitos de superfície no pavimento rígido e flexível: Concluiu-se que defeitos de superfície, como panelas e afundamentos em pavimento flexível, além de fissuras de canto e quebras localizadas em pavimentos rígidos, estão diretamente atrelados à condição de segurança viária e, portanto, necessitam de uma ação imediata de correção. Assim, a ausência de tais problemas devem ser garantida a qualquer momento do contrato,



DOI: [10.29327/1430212.49-98](https://doi.org/10.29327/1430212.49-98)

PROPOSTA DE PARÂMETROS DE PAVIMENTAÇÃO PARA RODOVIAS FEDERAIS CONCEDIDAS:
ESTUDO E FUNDAMENTAÇÃO

independentemente dos ciclos de monitoração. Além disso, cabe destacar que a ocorrência desses defeitos não necessariamente está relacionada ao desempenho ou à má gestão do pavimento, podendo ter diversas origens e fatores agravantes, como elevados índices de pluviosidade. Deste modo, entende-se ser mais adequado que as falhas de superfície sejam objeto de ação fiscalizatória rotineira, justificando sua exclusão do rol de parâmetros de desempenho, cuja avaliação ocorre apenas uma vez ao ano por meio de relatórios de monitoração. Além disso, destaca-se que essas irregularidades atualmente já são contempladas como objeto de ação da fiscalização, conforme especificado no Manual de Fiscalização de Rodovias Federais Concedidas (ANTT, 2016) e no art. 6º, incisos III e IV, da Resolução nº 4.071/2013 (ANTT, 2013), os quais estabelecem prazos para cumprimento das intervenções corretivas

- Supressão do parâmetro de áreas excessivamente remendadas: Em conformidade com o entendimento exarado para os defeitos pontuais no pavimento, compreende-se que a existência de áreas excessivamente remendadas não está necessariamente relacionada a um desempenho insatisfatório do pavimento, visto que a extensão dos panos de intervenção se trata de uma decisão de gestão da concessionária. Todavia, entende-se que o referido parâmetro possui relação direta com a satisfação do usuário sob o ponto de vista estético, devendo esse ser um aspecto de observância do ente regulador. Assim, para garantir o controle e eventual intervenção da agência reguladora, considerou-se pertinente que o referido parâmetro seja objeto de ação fiscalizatória rotineira, não se tratando, portanto, de questão atinente ao desempenho, podendo ser suprimido do rol de parâmetros para fins de aplicação de descontos para recomposição do equilíbrio econômico-financeiro do contrato.
- Substituição dos parâmetros de Valor de Resistência à Derrapagem (VRD) e Altura de Areia (HS) pelo *International Friction Index* (IFI): Segundo Bernucci *et al.* (2022), o IFI corresponde ao atrito de um veículo de passeio deslocando-se a 60 km/h, com pneus lisos e rodas travadas, sobre pavimento molhado, sendo expresso por dois valores, o F60 e o Sp, relacionados às medidas de atrito e textura, respectivamente. Portanto, nota-se que o IFI já contempla a avaliação da macro e microtextura em um único parâmetro, sem prejuízo da avaliação de desempenho operacional do pavimento. Além disso, o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) já contempla valores limites para o IFI correlacionados à conceitos de condição da rodovia, que variam de “Ótimo” a “Péssimo”. Assim, os valores do referido Manual foram adotados para a presente proposta, de maneira a garantir a condição mínima “Regular” na fase de Trabalhos Iniciais e Recuperação, e condição “Boa”, na fase de manutenção. Além disso, vale ressaltar que o parâmetro IFI já está contemplado em editais mais recentes da Agência de Transporte de São Paulo - ARTESP.
- Degrau entre pista e acostamento: Conforme relatado por Oliveira (2007), pesquisas realizadas na Carolina do Norte indicaram que 3,5% dos acidentes envolvendo apenas um veículo foram influenciados por descontinuidades na pista, sendo que 1% desses acidentes estavam relacionados à presença de degraus entre a pista e o acostamento. Tendo em vista a relação direta do desnível com a segurança viária, a presente proposta estabelece um valor máximo de 5 cm para degraus em pistas existentes, em consonância com a Instrução Normativa nº 16/DNIT Sede (DNIT, 2020). Para as pistas novas, pertencentes às Obras de Ampliação de Capacidade previstas no PER, foi sugerida a ausência de degraus. Além disso, considerando a previsão de levantamentos por meio de equipamentos a laser, foi admitida uma margem de tolerância de 1,2 cm de degrau nos segmentos individuais de 200 metros, de



- modo a evitar que intervenções, como a aplicação de microrrevestimento nas faixas de tráfego, precisem ser estendidas até o acostamento. Cabe ressaltar que limites de 1,2 cm de desnível entre faixas de tráfego e acostamentos são admitidos em editais recentes da ARTESP.
- Supressão do parâmetro de área exsudada: conforme exposto por Bernucci *et al.* (2022), a exsudação caracteriza-se pelo surgimento de ligante na superfície do pavimento, portanto, trata-se de um parâmetro relacionado à aderência entre pneu e revestimento. Todavia, ainda que pese a relação direta da exsudação com a segurança viária, salienta-se que a aderência pneu-pavimento já se encontra abarcada pelo parâmetro de *International Frictional Index* (IFI), viabilizando a supressão do parâmetro em comento. Além disso, é importante destacar que não foram encontradas especificações ou instruções normativas que estabeleçam procedimentos para o levantamento de áreas exsudadas ou mesmo que validem o limite de 1 m² estabelecido no PER de referência, justificando, portanto, sua supressão.
 - Supressão do parâmetro de Área Trincada Total (TR): Conforme proposta do PER de referência, a Área Trincada considera o somatório das áreas de trincas dos tipos FC-1, FC-2 e FC-3. Todavia, entende-se que a avaliação das trincas do tipo FC-1, além de pouco significativa do ponto de vista estrutural do pavimento, resulta em elevados percentuais de trincamento, o que inviabiliza o cumprimento dos valores limites por parte da Concessionária, ou seja, 15% de área trincada após a fase de recuperação. Além disso, é importante ressaltar que nos modelos de evolução de trincamento de pavimentos considerados nas modelagens dos contratos de concessão, os percentuais relativos às trincas do tipo FC-1 não são incorporados. Assim, a consideração desses tipos de trincas, além de abrir margem para possíveis divergências entre a fiscalização e as Concessionárias, mostra-se pouco eficiente para a avaliação do desempenho do pavimento, justificando sua supressão, sendo indicada apenas a avaliação da área trincada referente às trincas do tipo FC-2 e FC-3. Outro ponto importante de mudança diz respeito à extensão do segmento avaliado pela metodologia DNIT PRO 007/2003 (DNIT, 2003), que, no PER de referência, é fixada em 20 km de extensão, sendo reduzida na atual proposta para 1 km de extensão, avaliados de forma contínua por meio de equipamentos de varredura a laser.
 - Supressão da avaliação de trincas do tipo FC-3: Entende-se que a distinção visual entre trincamentos do tipo FC-2 e FC-3 é bastante subjetiva. Portanto, a avaliação individualizada de trincas desses tipos pode ocasionar divergências entre a equipe de fiscalização e os agentes regulados. Além disso, considera-se que a restrição de trincas do tipo FC-2 + FC-3, por si só, já impõe um limite para o trincamento FC-3, uma vez que este último surge como resultado da progressão das trincas FC-2, seguindo uma tendência natural determinada pelas características do tráfego e da estrutura do pavimento.
 - Alteração do parâmetro de deflexão característica (Dc) limitada a 50×10^{-2} mm para deflexão admissível em função do Volume Médio Diário comercial (VDMc) da rodovia: como se verifica no PER referência os valores de Deflexão Característica é fixo em 50×10^{-2} mm independentemente das características de tráfego da rodovia. Assim, considerou-se pertinente a avaliação do parâmetro em função do VDMc, visto que o tráfego se trata de uma variável importante na evolução da deflexão recuperável nos pavimentos, conforme pode ser observado em normativos técnicos amplamente consolidados no Brasil, tais como DNER PRO-011/79 (DNER, 1979) e DNER PRO-269/94 (DNER, 1994). Logo, para definição da Deflexão Admissível a ser considerada como referência foi adotada para presente proposta faixas de tráfego, que já se encontram em utilização em alguns contratos vigentes, tais como



DOI: [10.29327/1430212.49-98](https://doi.org/10.29327/1430212.49-98)

PROPOSTA DE PARÂMETROS DE PAVIMENTAÇÃO PARA RODOVIAS FEDERAIS CONCEDIDAS: ESTUDO E FUNDAMENTAÇÃO

Contrato de Concessão Edital nº 01/2022 e Contrato de Concessão nº 01/2023 - Edital de Concessão nº 01/2023, conforme pode ser verificado na Tabela 3. Outra alteração importante referente ao parâmetro em tela, diz respeito à periodicidade de monitoração, que foi alterada para quinquenal, visto que o parâmetro considera a avaliação da Deflexão admissível com projeção para 5 anos.

- Diferenciação dos valores limites dos parâmetros das pistas marginais e das pistas principais: destaca-se que a diferenciação se encontra prevista no § 1º do art. 16 da Portaria MT nº 995/2023, que institui a Política Nacional de Outorga Rodoviárias no âmbito do Ministério dos Transportes e de suas entidades vinculadas. Essa distinção surge devido às diferenças operacionais entre pistas marginais e pistas expressas, incluindo variações no volume de tráfego, tipos de veículos e velocidades de operação. Essas diferenças justificam a adaptação dos parâmetros para as pistas com menor demanda, resultando em uma alocação mais eficiente dos recursos disponíveis, de modo a contribuir para o alcance da modicidade tarifária.

Um grande avanço proposto diz respeito aos métodos de avaliação em campo. Assim, conforme pode ser observado na Tabela 4, privilegiou-se a utilização de equipamentos mais modernos e disponibilizados no mercado, dotados de dispositivos de levantamento como sensores, laser e vídeo registro para avaliação e identificação dos defeitos de superfície. Entende-se que o levantamento de forma contínua e automatizada, além de mais representativa, trata-se de levantamento menos subjetivo, contribuindo para evitar possíveis divergências entre as partes.

CONCLUSÃO

O presente estudo de caso teve como principal objetivo apresentar a proposta de revisão dos parâmetros de desempenho previstos nos PER, visando simplificá-los e padronizá-los, com o objetivo de buscar uma melhor gestão contratual, sem acarretar prejuízos ao desempenho dos pavimentos. Assim, conforme pode se verificar a presente proposta resultou na redução dos 22 parâmetros, previstos no PER referência, para 8 parâmetros totais, contemplando critérios atrelados ao desempenho funcional, estrutural e operacional do pavimento.

A supressão de parâmetros como defeitos superficiais em pavimentos rígidos e flexíveis, áreas remendadas e o IGG, evidencia uma abordagem mais precisa e orientada para questões de segurança. Esses parâmetros não estão necessariamente ligados ao desempenho do pavimento, mas sim à necessidade de ações imediatas ou já são considerados por outros parâmetros.

Ainda, a substituição por métricas mais abrangentes, como o *International Friction Index* (IFI), e a diferenciação de valores entre pistas marginais e principais, demonstram uma adaptação às necessidades específicas de cada trecho rodoviário.

Além disso, a ênfase em métodos de avaliação mais avançados, como o uso de equipamentos modernos de levantamento, visa uma análise mais objetiva e abrangente das condições das rodovias. Essas mudanças sinalizam um avanço significativo na gestão e manutenção das rodovias concedidas, buscando garantir não apenas a segurança dos usuários, mas também a eficiência na utilização dos recursos públicos.

Entende-se também que, para garantir a eficácia da proposta apresentada, é crucial que as instruções técnicas relacionadas às metodologias de avaliação em campo sejam descritas de forma detalhada em documentos técnicos específicos. Isso inclui aspectos como os tipos de equipamentos a serem utilizados, a velocidade de execução, calibração dos instrumentos, adaptação dos equipamentos às áreas de avaliação e a conformidade com os normativos técnicos correspondentes. Essa abordagem



Thiago Douglas Alvarenga Camelo,
Arilena Covalesky Dias,
Laynara Xavier Barroso

visa evitar possíveis divergências de interpretação entre as partes envolvidas, garantindo um levantamento preciso dos parâmetros e, conseqüentemente, menos transtornos para os usuários. Por fim, cabe ressaltar que a ANTT ainda trata todas as concessões rodoviárias de forma uniforme, porém, é reconhecido que cada rodovia tem suas particularidades em termos de demanda e características locais. Portanto, entende-se que ainda é possível ajustar os limites de parâmetros de forma mais específica para direcionar os recursos de forma eficaz para as características mais relevantes de cada trecho rodoviário.

REFERÊNCIAS

ANTT. AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Resolução nº 4071, de 03 de abril de 2013.** Regulamenta as infrações sujeitas às penalidades de advertência e multa por inexecução contratual na exploração da infraestrutura rodoviária federal concedida. Diário Oficial da União nº 65: Seção 1, pág. 93. Brasília, DF, 2013.

_____. Manual de Fiscalização de Rodovias Federais Concedidas – **Brasília: ANTT, 2016. 108 p.**

_____. Contrato de Concessão Edital nº 03/2021. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/concessionarias/lista-de-concessoes/ccr-rio-sp/documentos-de-gestao/riosp-contrato-e-aditivos/contrato-1/view>. 2021.

_____. **ANTT desburocratiza e prevê economia de R\$ 590 mi.** Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/resultado/-/asset_publisher/m2By5inRuGGs/content/id/122607> . Acesso: abr. 2024a.

_____. **Informações Gerais.** Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/informacoes-gerais>

. Acesso: abr. 2024b.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA, 2022.

CNT. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. Pesquisa CNT de rodovias 2023: Relatório gerencial, Brasília: CNT, SEST, SENAT, 2023. 204 pg.

DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem DNER - PRO 11/79. Procedimento – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento B. Rio de Janeiro. 1979.

_____. PRO 269/94. Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV. Rio de Janeiro. 1994.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre. DNIT 006/2003 – PRO. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. 2ª Edição. Rio de Janeiro, Equipe técnica Engesur Ltda, 2006.

_____. PRO – 007/2003: Levantamento para avaliação da condição da superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semirrígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos. Rio Janeiro, 2003.

ESTEVES, R. L. A modelagem das concessões rodoviárias federais brasileiras: Avaliação de fatores que influenciam na financiabilidade dos projetos. Monografia (Especialização em Controle da Desestatização e da Regulação) – Instituto Serzedello Corrêa, Escola Superior do Tribunal de Contas da União, Brasília DF, 2023.

OLIVEIRA, E.L. M. de. **Considerações sobre o projeto de acostamentos para rodovias.** 2007. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transporte, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.



MACROSSIMULAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE ESTIMATIVA DE VMDA NA MALHA RODOVIÁRIA DE MINAS GERAIS

Anna Bárbara Fonseca Duarte¹; Thais Berger Barbosa da Silva¹; Bruna Cristina Beltrão Silva Beilegoli¹

RESUMO

O artigo busca oferecer uma visão abrangente e diagnóstica da situação atual das rodovias em Minas Gerais, com o objetivo de fornecer informações estratégicas para apoiar o desenvolvimento, implementação e avaliação de políticas públicas relacionadas à rede de transporte rodoviário. O trabalho aponta para a implantação de novas metodologias, bem como a melhoria das já existentes, de modo a aprimorar as rotinas de Gestão dos Ativos Rodoviários no Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais. Através do *software* de modelagem de tráfego, denominado *TransCAD*, foi elaborado um método para analisar e estimar a previsão de demanda de tráfego nas rodovias pavimentadas e não-pavimentadas da malha rodoviária estadual. O trabalho foi dividido em duas etapas principais: a primeira considerando uma simulação e modelagem que contempla todo Brasil e os países fronteirais e a segunda levou em conta o método da subárea, que basicamente é um recorte dos segmentos rodoviários para o estado de Minas Gerais. Para a estimativa do volume médio diário (VMD) na primeira etapa, foi utilizado na geração da matriz de Origem-Destino, cerca de 500 postos com dados de tráfego, agrupados nas categorias de veículos leves e pesados. Após a geração e validação da matriz de viagens no âmbito nacional, foi obtido o recorte da matriz da subárea, que apresentou 853 centroides internos e 108 centroides externos. Os resultados preliminares foram satisfatórios, já que o trabalho foi um piloto desenvolvido para subsidiar decisões na esfera do planejamento estratégico da Gerência de Ativos Rodoviários.

PALAVRAS-CHAVE: Macrossimulação; *TransCAD*; Transporte, Tráfego; VMD.

ABSTRACT

The article seeks to offer a comprehensive and diagnostic view of the current situation of roads in Minas Gerais, aiming to provide strategic information to support the development, implementation and evaluation of public policies related to the road transportation network. The article proposes new approaches, as well as the improvement of existing ones, for enhancing every activity of the Road Asset Management in the Department of Highways of the State of Minas Gerais. Using traffic modeling software *TransCAD*, a method was developed to assess and estimating traffic demand forecasts on the state's paved and unpaved roads. The study was divided into two major stages: the first explored simulation and modeling on which covers the whole of Brazil and the bordering countries, while the second considered the sub-area method, which is basically a cross-section of road segments for the state of Minas Gerais. To estimate the average daily volume (AADT) in the first stage, around 500 stations with traffic data were used to generate the Origin-Destination matrix, grouped into light and heavy vehicle categories. After generating and validating the national travel matrix, the sub-area matrix was cut out, showing 853 internal centroids and 108 external centroids. The preliminary results were satisfactory, since the work was a pilot project designed to support decisions in the strategic planning sphere of the Road Asset Management.

KEY WORDS: Macro-traffic simulation; *TransCAD*; Transportation, Traffic, AADT.

¹ Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais - DER-MG, e-mail: anna.barbara@der.mg.gov.br; thais.berger@der.mg.gov.br; bruna.beilegoli@der.mg.gov.br.



INTRODUÇÃO

O setor de transporte está diretamente vinculado ao progresso de uma nação, proporcionando acessibilidade e mobilidade entre pessoas e mercadorias, evidenciando o seu grau de importância na economia (COLAVITE; KONISHI, 2015). Nesse cenário, fez-se necessário garantir conforto, segurança e fluidez para os usuários das rodovias, por meio de uma série de investimentos em implantação, manutenção e conservação de todo o sistema rodoviário.

Na matriz de transporte brasileira, o transporte rodoviário atualmente participa com 65% do deslocamento das cargas e 95% dos passageiros no país, de acordo com os dados da última pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023), o que demonstra que a economia brasileira é bastante dependente desse modo de transporte.

De acordo com os dados do Sistema Nacional de Viação (SNV), a malha brasileira se estende por 1,7 milhão de quilômetros de rodovias, sendo 12,4% pavimentadas (cerca de 213,5 mil quilômetros). As vias não pavimentadas, possuem considerável extensão, totalizando cerca de 1,4 milhão de quilômetros (78,5% da malha).

O cenário das rodovias sob jurisdição do estado de Minas Gerais apresenta cerca de 80,3% de vias pavimentadas e 19,7% de vias não pavimentadas, de um total de 28.144 quilômetros, de acordo com último levantamento de cadastro da malha do Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, que incluiu também, a contagem volumétrica e classificatória em mais de 1.000 postos para avaliação do tráfego e hierarquização da rede. (DER-MG 2022/2023).

Vale destacar a relevância da rede rodoviária do estado no contexto nacional, pois promove interação direta com 6 estados da federação, compondo as principais rotas entre o Sudeste e Centro-Oeste, além das rotas do Sul ao Nordeste. Assim, surge a necessidade de quantificar o volume médio diário (VMD) em todo o Sistema Rodoviário Estadual (SRE), além de sua respectiva distribuição veicular. Contudo, é um trabalho oneroso e moroso, principalmente devido à extensão e as características da malha rodoviária de Minas Gerais. Nesse contexto, o artigo tem como principal objetivo descrever as etapas do Projeto Piloto da Gerência de Gestão de Ativos Rodoviários, que visam simular e estimar, para cada SRE, o respectivo VMD.

Este projeto encontra-se diretamente ligada às recomendações da Diretoria de Planejamento Engenharia e Inovação pertencente ao DER-MG, quanto a centralização e o tratamento dos dados técnicos e gerenciais sobre os ativos rodoviários, e o estabelecimento de macro diretrizes para planejamento da gestão da malha e o fomento da criação de políticas inovadoras.

A ferramenta utilizada para este Projeto Piloto foi o *software* de Macrossimulação *TransCAD*. O *TransCAD* é um *software* amplamente utilizado para análise de transporte e planejamento, oferecendo ferramentas para modelagem e simulação de redes de transporte, análise de tráfego e previsão de demanda. Suas principais características e funções incluem: ferramentas de mapeamento e visualização, sendo o único software que combina completamente GIS com recursos para modelagem de demanda e logística. (ALMASRI; AL-JAZZAR, 2013).



DOI: [10.29327/1430212.49-76](https://doi.org/10.29327/1430212.49-76)

MACROSSIMULAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE ESTIMATIVA DE VMDA
NA MALHA RODOVIÁRIA DE MINAS GERAIS

MÉTODO

Tendo em vista a demanda por um planejamento eficiente do sistema de transporte rodoviário, e objetivando a priorização de investimentos em Minas Gerais, foi realizada nos anos de 2022 e 2023, a campanha de contagem volumétrica e classificatória em cerca de 1.000 postos, visando a avaliação do tráfego e a hierarquização da rede nas rodovias do estado.

Considerando a indisponibilidade do volume de tráfego para todos os trechos viários, a literatura científica propõe a estimativa dessa variável a partir de interpoladores espaciais.

Este estudo de caso utilizou técnicas para a construção da macrossimulação, que é um modelo de tráfego consolidado, onde é possível obter um modelo cujo comportamento se assemelhe à realidade observada em campo.

Coleta e Tratamento dos Dados

Para a construção do modelo de tráfego macroscópico, foram coletadas as informações referentes à situação atual do sistema rodoviário em estudo, principalmente em relação às características de demanda, ou seja, quantidade de veículos nas principais rodovias e acessos, além dos aspectos relativos aos fluxos de viagem (municípios de origem e destino).

Foram fornecidos pelo Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes (DNIT, 2023) os dados da última versão adotada na estimativa de *VMDa* de toda a rede rodoviária federal pavimentada com ano-base de 2022. Em conformidade com os objetivos deste estudo, o DNIT (2023) destaca que utiliza dessa estimativa de volume de tráfego para avaliar o planejamento estratégico a fim de subsidiar as análises de engenharia conceitual e funcional.

A rede rodoviária vetorizada de posse do DNIT contém a representação das rodovias por meio de *links* (ligações), além de conectores que fazem a ligação entre os centroides (origens e destinos das viagens) e as rodovias e os vértices/nós que representam pontos de conexão entre os arcos/arestas e/ou centroides, como apresentado na Figura 1.

A rede digital de simulação viária é composta por um conjunto de informações georreferenciadas como dados de relevo, velocidade, sinuosidade, capacidade, condição do pavimento, tipo de pista (dupla, simples), tipo de pavimento (asfaltado, não pavimentado), dentre outras.

A versão principal utilizada do SNV foi a 202301B (primeira versão oficial publicada no ano de 2023). A rede utilizada para a estimativa do *VMDa* 2022 apresenta cerca de 23.100 *links*, sendo 17.478 *links* rodoviários (federais, estaduais e municipais) e 5.622 conectores. Além disso, a modelagem contou com 5.576 centroides (municípios brasileiros e países limítrofes) que representam as zonas de tráfego funcionando como polo de produção e atração de viagens.

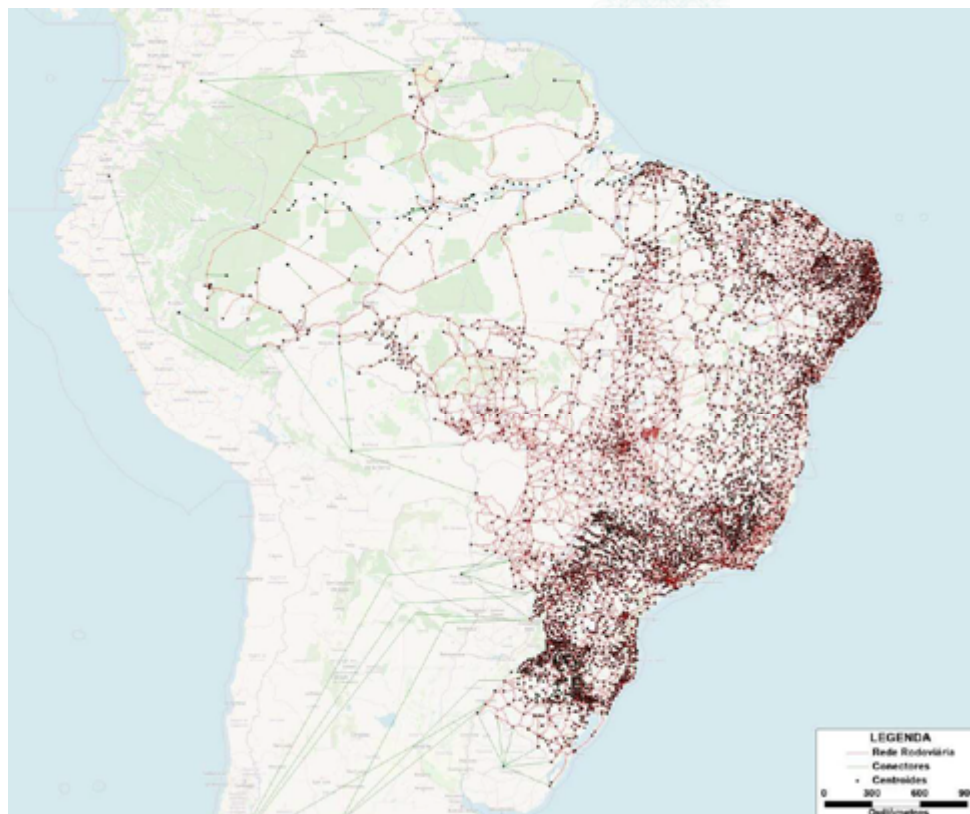


Figura 1. Rede rodoviária da modelagem do DNIT (DNIT, 2023)

Em relação ao zoneamento, no estudo do DNIT considerou-se como zona de tráfego todos os municípios brasileiros e os países limítrofes, como Uruguai, Paraguai, Peru, Suriname e Venezuela. Além dos arquivos de rede georreferenciados, foi fornecida a matriz final estimada e calibrada para o ano de 2022. Para construção da matriz, o DNIT adotou cerca de 765 postos referenciais (*Counts Location - CL*), pontos de controle que permitem realizar comparações entre os volumes reais observados em campo e os estimados na modelagem. Os *counts* auxiliam na calibração e nos ajustes do modelo de alocação de fluxo em rede. Os dados de tráfego dos *counts* foram agrupados em categorias de veículos segregadas dentre: Leves, composta por carros de passeio (automóveis, camionetas, motos, vans e kombis); e pesados, composta por ônibus e caminhões.

Foram analisados, ainda, os resultados obtidos das Contagens Volumétricas Classificadoras (CVC), oriundas do Programa Estadual de Contagem de Tráfego (PECT) dos anos 2022 e 2023 do DER-MG. Ao todo, o PECT contou com quase 1 mil postos de contagem, sendo 740 de seção e 219 de interseção espalhados por toda a malha rodoviária estadual, conforme Figura 2.

Os postos foram monitorados durante 24 horas em dias considerados típicos, ou seja, dias de semana sem feriado, variando entre 1, 3 ou 7 dias. Os dados de campo foram ajustados considerando o ajuste de sazonalidade semanal e mensal conforme fatores adotados pelo DER-MG.



DOI: 10.29327/1430212.49-76

MACROSSIMULAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE ESTIMATIVA DE VMDA
NA MALHA RODOVIÁRIA DE MINAS GERAIS

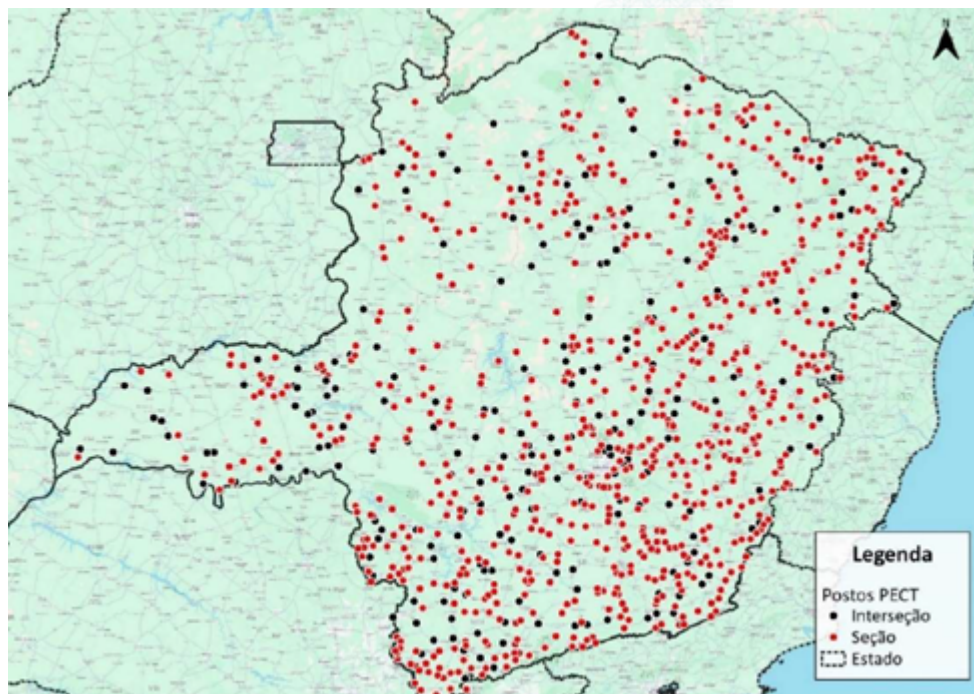


Figura 2. Postos de contagem do PECT (OS AUTORES, 2024)

Além dos dados de tráfego, também foi utilizada a rede rodoviária georreferenciada do Sistema Rodoviário Estadual (SRE) — ano base 2024 — que apresenta diversas características do trecho como extensão, tipo de pista e revestimento (Figura 3). Esses dados são essenciais para a caracterização das vias na modelagem pois influenciam diretamente no cálculo dos custos operacionais e outras informações como a capacidade, tempo de viagem e parâmetros da função de atraso.

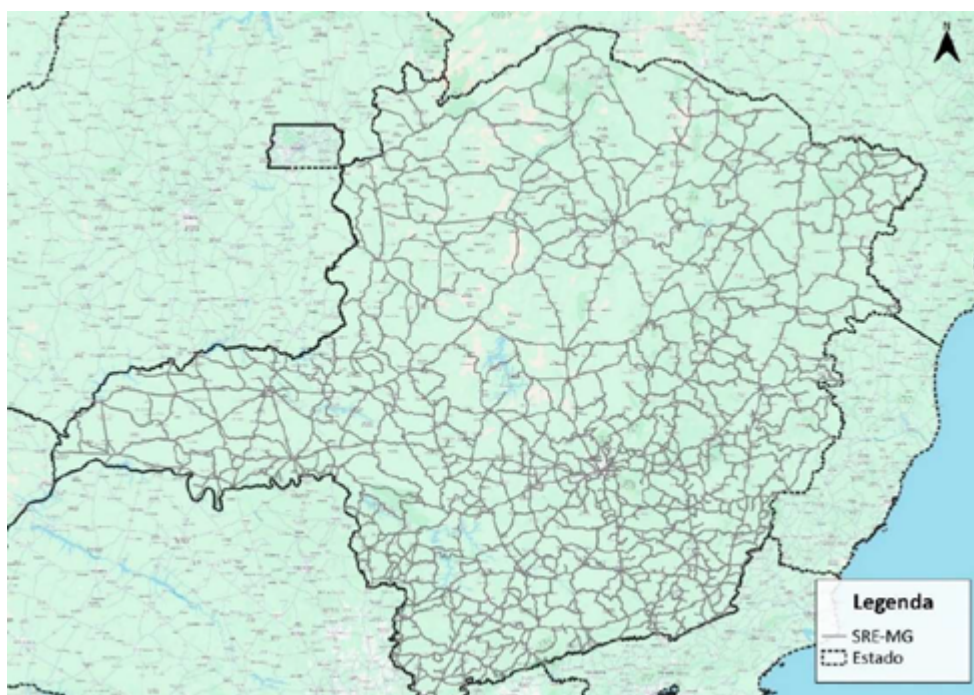


Figura 3. Sistema Rodoviário Estadual (SRE) de Minas Gerais (OS AUTORES, 2024)



Construção do modelo de simulação

Para o desenvolvimento do modelo de simulação, foi escolhido o *software* TransCAD 5.0 devido à facilidade de compatibilização e adaptação entre as diversas fontes de dados. Segundo a Caliper (2024), o TransCAD une recursos de modelagem de transporte e GIS (*Geographic Information System*) ou *SIG* (Sistemas de Informação Geográfica) em uma única plataforma. Além disso, o *software* é compatível com os estilos de modelagem de viagens mais utilizados, incluindo métodos de planejamento e modelos de demanda de quatro etapas, além de modelar fluxos de passageiros e de carga em nível estadual, nacional e internacional.

Após a compatibilização das diferentes fontes de dados, foi realizada a projeção do tráfego aferido durante o PECT para o ano de 2024, uma vez que as contagens foram realizadas entre 2022 e 2023. Devido à falta de informações para cálculo da taxa de crescimento dos postos de *count*, adotou-se uma taxa de crescimento anual de 3%, próxima da taxa de crescimento econômico do país como um todo, conforme recomendações do Manual de Estudos de Tráfego (DNIT; 2006).

Em seguida, foi possível relacionar os postos com os *links* da rede rodoviária e o resumo dos *counts* utilizados, por tipo (seção e interseção) e dias pesquisados, conforme pode ser visto na Tabela 1. Ao todo, na primeira etapa do estudo foram inseridos 417 *counts*, sendo 13 de interseção e 404 de seção.

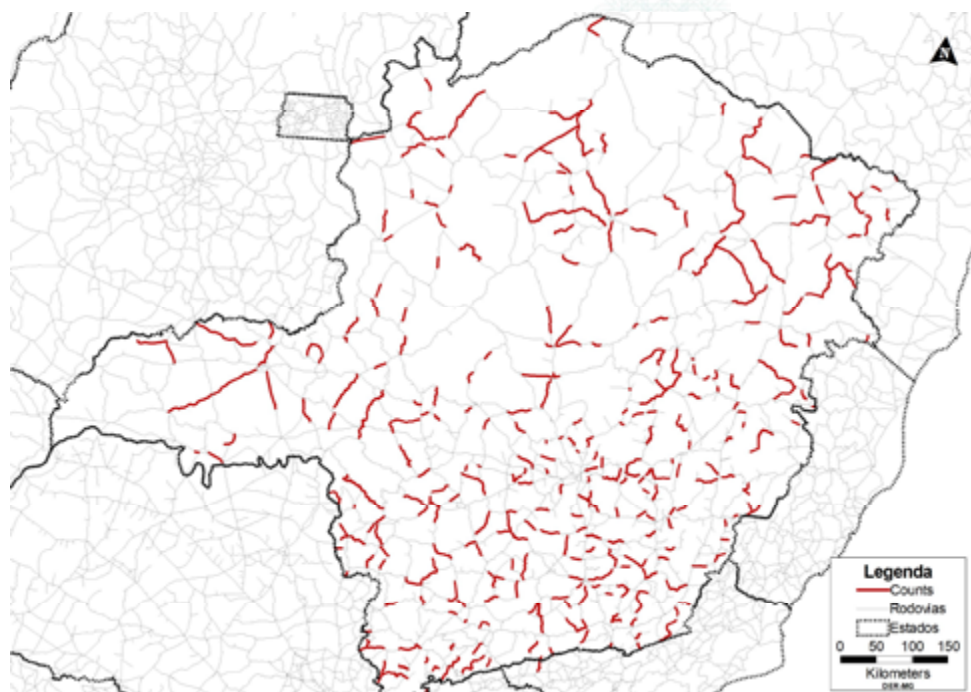
Tabela 1. Count locations utilizados na modelagem (OS AUTORES, 2024)

Tipo	Duração da pesquisa	Quantidade
Interseção	1 dia	13
	1 dia	344
Seção	3 dias	24
	7 dias	36
Total geral		417

Cabe destacar que apenas parte dos postos de interseção foi inserida até o momento, visando maior controle dos dados de tráfego das vias que fazem parte dos entroncamentos. A Figura 4 apresenta os *counts locations*, provenientes da projeção de tráfego do PECT, inseridos na primeira etapa da modelagem macroscópica.



DOI: 10.29327/1430212.49-76

MACROSSIMULAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE ESTIMATIVA DE VMDA
NA MALHA RODOVIÁRIA DE MINAS GERAISFigura 4. Representação dos *count locations* (OS AUTORES, 2024)

Após a etapa de ajuste e posicionamento dos *counts*, foi necessário construir uma matriz origem-destino (OD) que fosse representativa dos fluxos de tráfego de Minas Gerais. Em função da inexistência de pesquisas OD que caracterizassem o estado em sua totalidade e devido aos altos custos e tempo para promover uma campanha desse tipo de pesquisa, foi necessário estimar a matriz OD a ser alocada no modelo. Esse método é embasado no estudo de Pereira (2018), cujo objetivo foi encontrar uma matriz que satisfaça o tráfego observado nas vias por meio dos postos de controle (*Counts Locations*).

De posse de uma matriz OD semente (DNIT, 2023) e das contagens de tráfegos observadas em campo, foi possível gerar um cenário base para que a alocação de tráfego possa ser executada. O processo de alocação do tráfego e de calibração do modelo corresponde ao ajuste da rede rodoviária simulada a fim de torná-la representativa da realidade verificada em campo. Assim, as rotas determinadas para os diferentes pares OD passam a corresponder aos caminhos escolhidos pelos motoristas.

Após a primeira alocação, foi possível verificar a aderência e compatibilização do modelo. Esse processo é iterativo e é executado até que a convergência seja obtida, visando uma simulação satisfatória.

Para as alocações realizadas nesta etapa, buscou-se utilizar dos mesmos parâmetros do estudo do DNIT (2023), uma vez que o método utilizado pelo órgão já é consolidado em âmbito nacional. Os atributos dos *links*, tais como custo generalizado, capacidade diária e horária, tipo de pista, parâmetros da função de atraso (BPR), extensão e tempo de percurso dos *links*, foram mantidos conforme última atualização (VMDa 2022).

Em resumo, o processo de alocação de tráfego e estimativa de matriz OD adotou os seguintes parâmetros:

- i. Método de alocação de tráfego: *User Equilibrium* – são métodos que buscam a resolução do primeiro princípio de Wardrop (1952), que postula que o equilíbrio é atingido a partir do



- momento em que nenhum usuário conseguirá um menor custo de viagem ao alterar sua rota, sendo que as rotas são escolhidas de forma determinística;
- ii. Função de degradação de velocidade: *Bureau of Public Roads* (BPR) – parâmetros específicos α e β de ajuste de crescimento da função de atraso: 0,15 e 4, respectivamente;
 - iii. Fator de equivalência veicular: *Passenger Car Equivalent* (PCE) – adotado por classe utilizada, trata-se do impacto relativo de diferentes classes veiculares no tráfego em unidades de carro de passeio (UCP), sendo 1,0 para veículos Leves e 2,5 para Pesados;
 - iv. Valor do Tempo (VOT) de viagem para as categorias: 20 para veículos Leves e 40 para veículos Pesados;
 - v. Quantidade de iterações dos processos de alocação de tráfego e de ajustes/adequações nas Matrizes OD: 500 e 20, respectivamente.

O valor do tempo de viagem é definido como a predisposição que um indivíduo tem de pagar pela redução em uma unidade de seu tempo de viagem. Nesse sentido, cabe destacar que o processo para obter o VOT das classes envolve tratamento proveniente da pesquisa de Preferência Declarada (PD). Essas pesquisas são utilizadas frequentemente por planejadores de transportes para prever o impacto na demanda de viagens.

Devido à onerosidade da execução e tratamento desses dados, buscou-se na literatura e em projetos antigos valores de VOT base, tanto na esfera nacional quanto na estadual. No estudo desenvolvido por Brito e Strambi (2007), foi estimado o valor de R\$16,44/h para o tempo de viagem de até 90 minutos de duração e R\$14,62/h para viagens com duração entre 91 minutos e 4 horas.

Após as etapas descritas, foi realizado um ajuste da alocação por meio do método denominado “Estimação da Matriz OD” (*Origin-Destination Matrix Estimation* - ODME) que buscou, a partir da matriz semente fornecida e de contagens em pontos de controle (CL), distribuir o tráfego de maneira que a rede de simulação represente o tráfego real de Minas Gerais. A ODME gerou um arquivo de matriz contendo os fluxos OD estimados por tipo (Leves e Pesados).

Posteriormente à geração da matriz, foi preciso validar os dados provenientes do *TransCAD* com o objetivo de comparar o resultado do volume estimado (alocado) com o volume observado (contado). Para tanto, foi utilizado um dos métodos mais aplicados para validação da modelagem macroscópica, o modelo da função estatística formulada pelo *Geoffrey E. Havens* (GEH). Essa equação foi desenvolvida empiricamente para a validação de dados de simulação de tráfego, em que cada validação é feita individualmente para cada par de dados simulado-observado. A Equação 1 apresenta a fórmula utilizada neste método, na qual o q_{simulado} se refere ao volume simulado na rede e o $q_{\text{observado}}$ representa o volume de tráfego contado em campo.

$$GEH = \sqrt{\frac{2 \cdot (q_{\text{simulado}} - q_{\text{observado}})^2}{(q_{\text{simulado}} + q_{\text{observado}})}} \quad (\text{Equação 1})$$

De acordo com Vilarinho (2008), um valor de GEH menor que 5 para 85% dos casos de uma seção é um valor aceitável. Para a soma de todas as seções o valor do GEH deverá ser inferior a 4. Ou seja, quando a classe da função GEH for menor que 5, o resultado é aceitável e indica boa adesão do método quando comparado aos dados de campo.

Além da GEH, utilizou-se o método do coeficiente de determinação conhecido por r^2 , que basicamente computa o ajuste de um modelo linear generalizado, comparando também os volumes alocados e os volumes observados em campo. O r^2 varia de 0 até 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste do modelo.



DOI: 10.29327/1430212.49-76

MACROSSIMULAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE ESTIMATIVA DE VMDA
NA MALHA RODOVIÁRIA DE MINAS GERAIS

Assim, a partir do ajuste da matriz estimada para o Brasil, foi possível dar prosseguimento aos procedimentos de estimativa de VMD na malha rodoviária estadual mineira.

O primeiro passo foi reduzir a área de estudo focando apenas nos *links* rodoviários que passam por Minas Gerais e nas vias de ligação com os estados limítrofes, por meio de uma *sub-área*. De acordo com a Caliper (2024), ao prever a demanda de transporte para uma região o usuário pode realizar um estudo mais detalhado do tráfego dentro de uma subárea.

A subárea definida neste trabalho foi delimitada em cerca de 100 metros externos à área do estado de Minas Gerais, conforme mostra a Figura 5.

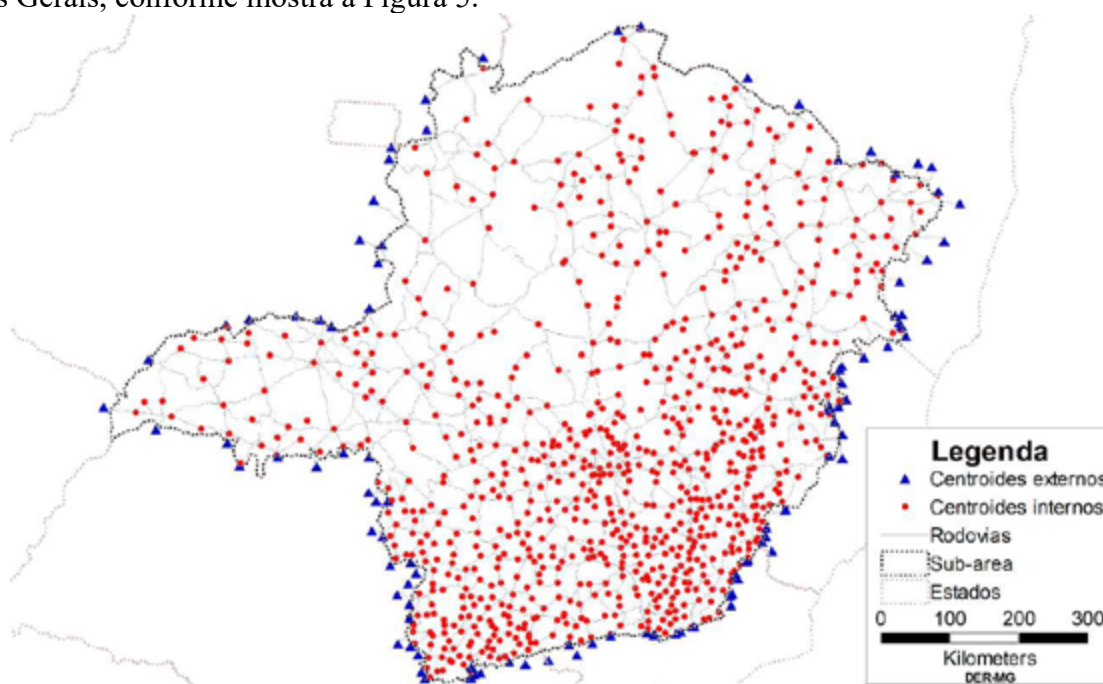


Figura 5. Área utilizada na subárea (OS AUTORES, 2024)

A partir da criação da subárea, foi possível gerar a matriz de viagens O-D considerando os centroides externos e internos. Os centroides internos são todos aqueles que representam municípios mineiros e os centroides externos são aqueles que se conectam aos *links* localizados na divisa de Minas Gerais com outros estados.

A matriz de viagem gerada considerou viagens que tiveram:

- i. origem e destino em centroides externos, mas que atravessam segmentos de rede da subárea;
- ii. origem em um centroide externo e destino em um centroide interno;
- iii. origem em um centroide interno e destino em um centroide externo;
- iv. origem e destino em um centroide interno da subárea.

Próximas etapas do método

Para as próximas etapas do trabalho, será realizado um ajuste dos *links* e centroides considerando a rede rodoviária do SRE-MG de 2024, visto que a rede estadual conta com maior número de *links*, os traçados representam melhor a sinuosidade das vias e as rodovias estão mais detalhadas no nível municipal.



Além dos ajustes de rede, será estimado um modelo para calcular os custos de deslocamento dos segmentos da rede. Para isso, serão considerados as seguintes variáveis: características de pista, extensão do *link*, perfil geométrico, valor do pedágio, relevo, valor da gasolina e as condições do pavimento. A finalidade dessa etapa será obter os tempos de viagem e os custos operacionais para as diferentes categorias de veículo simuladas.

Os parâmetros de rede também serão atualizados, tendo em vista as características regionais mais recentes como a situação do pavimento (Bom, Regular, Ruim e Péssimo), Rise&fall e curvatura, e parâmetros da função BPR, denominados *Alpha* e *Beta*.

Assim, com todos os processos finalizados, serão realizadas simulações da matriz gerada com base na subárea para toda a rede rodoviária do estado presente no SRE-MG 2024. A validação da matriz final alocada será feita a partir do método apresentado anteriormente.

RESULTADOS

Os resultados apresentados nesta seção se referem aos processos executados até o recorte da rede em uma subárea. Importante destacar, que para melhor alocação de tráfego nas rodovias, foi considerada uma série de cenários, variando os dados de entrada, localização dos *counts* e alterando os parâmetros de simulação.

Conforme apresentado no método, cada um dos cenários foi avaliado e analisado usando o teste estatístico denominado *GEH*, comparando os resultados estimados com os dados de tráfego reais. O *GEH* é uma variação do clássico teste estatístico Chi-Quadrado que incorpora tanto o erro absoluto como o erro relativo.

O primeiro resultado do trabalho foi a obtenção da matriz estimada de tráfego considerando todos os estados brasileiros e países da fronteira, dando importância para os 417 *counts* de Minas Gerais, oriundos do PECT. O processo iterativo para obter essa matriz foi concluído com um r^2 de 0,76 e um y de 0,67. Os resultados *GEH* indicou maior aderência do modelo na categoria de veículos denominados Pesados, com 67% dos *counts* nas classes “A” e “B” do modelo estatístico. Já para a categoria denominada Leves, cerca de 49% dos *counts* apresentaram volumes alocados na classe “A” e “B”.

Desataca-se que apenas 2% do total de *links* que compõem a rede (23.100) não tiveram nenhum volume alocado, sendo a maior parte desses segmentos acessos rodoviários para pequenos distritos. Considerando a malha rodoviária mineira, o modelo atribuiu tráfego para cerca de 2,9 mil segmentos, apenas 8 *links* não apresentaram tráfego alocado.

Durante o processo de calibração do modelo, foram encontrados alguns desafios a serem resolvidos nas próximas etapas do trabalho. Alguns postos com tráfego observado estão localizados em vias cuja principal troca de viagens se dá entre municípios de grande população e distritos. Todavia, como os distritos não foram considerados no zoneamento, o tráfego alocado tende a ser menor do que a realidade observada em campo e, nesse caso, o zoneamento deve ser repensado.

Mas apesar dos desafios, foi possível obter o mapa de carregamento da Figura 6 que considera a soma das duas categorias alocadas (Leves e Pesados).

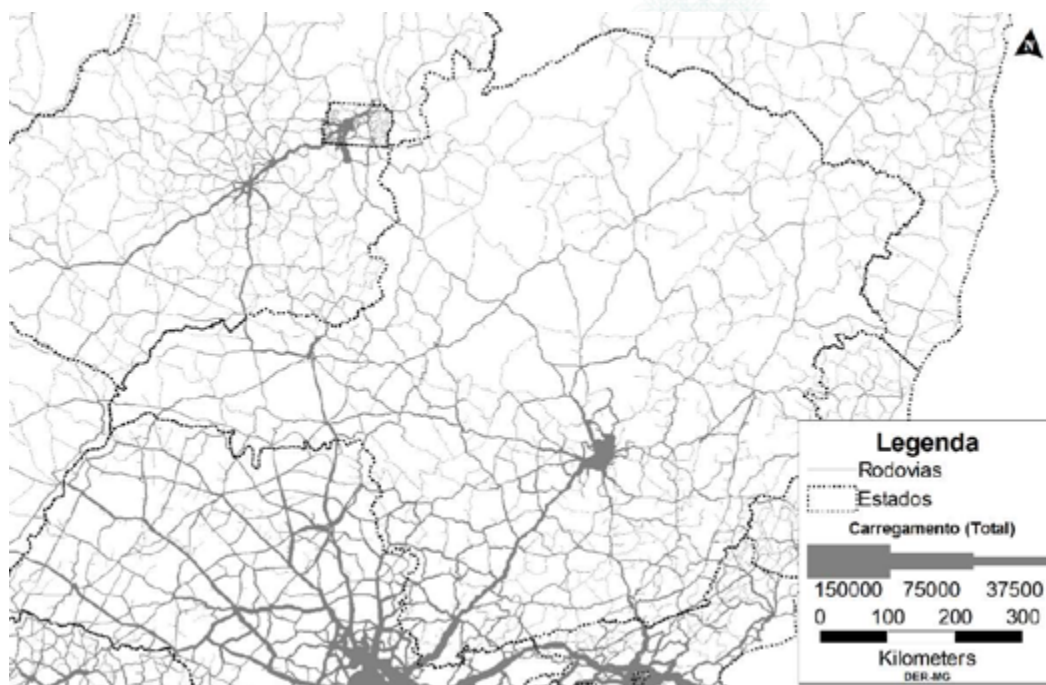
DOI: [10.29327/1430212.49-76](https://doi.org/10.29327/1430212.49-76)MACROSSIMULAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE ESTIMATIVA DE VMDA
NA MALHA RODOVIÁRIA DE MINAS GERAIS

Figura 6. Mapa de carregamento total da matriz estimada – Brasil (OS AUTORES, 2024)

A definição e construção da subárea foi satisfatória, selecionando apenas os *links* rodoviários da área de interesse e os segmentos adjacentes. Ao todo, a subárea foi gerada com 3.172 *links*, sendo 3.059 internos e 113 os segmentos de atravessamento (externos). Além dos *links*, os centroides internos selecionados foram 853, número que corresponde ao total de municípios mineiros. Já a seleção dos centroides externos, que fazem parte da malha rodoviária dos estados limítrofes, contou com 108 itens.

CONCLUSÃO

Em um primeiro momento, os resultados alcançados são satisfatórios e correspondem às expectativas iniciais, considerando que o trabalho foi um Piloto da Gerência Gestão de Ativos Rodoviários do DER-MG, apresentando-se como uma inovação dentro do órgão com o uso do *software* e da metodologia de alocação de tráfego.

Nesta primeira etapa da modelagem macroscópica, cerca de 50% dos postos de contagem do PECT foram utilizados como *count* e apresentaram bons resultados. Ainda há disponível uma quantidade significativa de postos que serão acrescentados para melhorar a alocação de tráfego do modelo na segunda etapa da modelagem.

Durante as simulações notou-se que o parâmetro *PCE* (*Passenger Car Equivalent*) de 2,5 para a categoria de veículos pesados demonstrou melhor ajuste entre o volume contado e alocado no modelo, quando comparado com os resultados das simulações com *PCE* de 2,0.

O modelo apresentou bons resultados em relação à distribuição de tráfego para os segmentos de rede correspondentes aos SREs de Minas Gerais, visto que menos de 0,1% dos *links* pertencentes ao estado mineiro não tiveram tráfego atribuído. Além disso, foi possível identificar as principais interações com os outros estados da federação por meio das rodovias BR-381, BR-116, BR-040, BR-050 e BR-365.



Destaca-se também que a simulação desenvolvida neste trabalho incluiu os *links* rodoviários não pavimentados. Esses segmentos são de extrema importância pois muitas vezes estão entre trechos pavimentados e podem compor uma rota a ser priorizada para investimentos.

Por fim, é importante salientar que os resultados são voltados para análises na esfera do planejamento estratégico e assim será possível definir as prioridades de investimentos nas avaliações preliminares de engenharia e nos estudos rodoviários da Diretoria de Planejamento, Engenharia e Inovação do DER-MG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMASRI, Essam & AL-JAZZAR, Mohammed. (2013). **TransCAD and GIS Technique for Estimating Traffic Demand and Its Application in Gaza City**. Open Journal of Civil Engineering. 03. 242-250. 10.4236/ojce.2013.34029.
- BRITO, André & STRAMBI, Orlando. (2009). **Análise de características relacionadas à variação do valor do tempo de viagem de motoristas usando técnicas de preferência declarada**. TRANSPORTES. 15. 10.14295/transportes.v15i1.47.
- CALIPER. TransCAD User's Guide. Caliper Corporation, Newton, MA, 2024. Disponível em: <https://www.caliper.com/tcovu.htm>. Acesso em: 18 mar. 2024
- COLAVITE, Alessandro Serrano & KONISHI, Fábio. **A matriz do transporte no Brasil: uma análise comparativa para a competitividade**. (2015). 12 f. TCC – Gestão e Tecnologia, FATEC, Rio de Janeiro, 2015.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias 2023**: Relatório Gerencial. Brasília, 2023.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT Nº 01/2023**: síntese da metodologia para estimativa do volume médio diário anual – **VMDa** 2022 em toda a malha rodoviária federal pavimentada. Brasília, 18 de ago. 2023. DNIT, 2023. Disponível em: https://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Modelagem/NT_2023_VMDA2022.pdf. Acesso em: 4 mar. 2024.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Estudos de Tráfego**. Rio de Janeiro, 15 de ago. 2006. DNIT, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723_manual_estudos_trafego.pdf. Acesso em: 15 abr. 2022.
- PEREIRA, Henrique de Medeiros. **Sistema de suporte à decisão para priorização de investimentos em rodovias utilizando inteligência geográfica**. (2018). Tese (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2018.
- VILARINHO, Cristina Alexandra Teixeira. **Calibração de modelos microscópicos de simulação de tráfego em redes urbanas**. (2008). Tese (Mestrado em engenharia civil – especialização em vias de comunicação) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2008.
- WARDROP, J. G. "Some theoretical aspects of road traffic research" **Proceedings of the Institute of Civil Engineers: Engineering Divisions**, volume 1. London: Thomas Telford: 325–362, 1952.



ESTUDO DE CASO DA CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA E MANUTENÇÃO DA RODOVIA BR-122: TRECHO QUIXADÁ-BANABUIÚ

Joázy Sousa Lopes¹

RESUMO

Este trabalho aborda as características gerais e técnicas da Rodovia BR-122, uma via de extrema importância para a conexão entre as regiões norte e centro-sul do Estado do Ceará. Com uma extensão de 1840 km, a BR-122 é uma rodovia longitudinal que atravessa vários estados e municípios, começando no Ceará e terminando em Minas Gerais. A via é fundamental para o transporte de pessoas e mercadorias, sendo considerada um corredor logístico. O segmento analisado neste estudo abrange cerca de 56,51 km, iniciando em Quixadá e indo até Banabuiú, no Ceará. Detalhes técnicos incluem tipos de revestimento, larguras das faixas e acostamentos, além de velocidades permitidas em diferentes trechos. A classificação da rodovia varia de arterial principal a arterial secundário, dependendo do fluxo de veículos e das características das cidades atravessadas. Dados de tráfego coletados em 2018 e 2020 revelam padrões sazonais de fluxo, com predominância de veículos de passeio e comerciais. O Governo Federal realizou investimentos significativos na recuperação e manutenção da BR-122, melhorando as condições de trafegabilidade e segurança da via. O estudo conclui ressaltando a importância econômica da BR-122 para o interior do Ceará e sua contribuição para o desenvolvimento regional. Os dados e informações apresentados neste estudo fornecem também uma base relevante para pesquisas futuras sobre essa rodovia essencial para o Estado.

PALAVRAS-CHAVE: Rodovia; Pavimento flexível; BR-122; Recuperação rodoviária; Pavimentação asfáltica.

ABSTRACT

This paper addresses the general and technical characteristics of Highway BR-122, a road of utmost importance for connecting the northern and central-southern regions of the state of Ceará, Brazil. With a length of 1840 km, BR-122 is a longitudinal highway that traverses several states and municipalities, starting in Ceará and ending in Minas Gerais. The road is essential for the transportation of people and goods, being considered a logistical corridor. The segment analyzed in this study covers approximately 56.51 km, starting in Quixadá and ending in Banabuiú, in Ceará. Technical details include types of pavement, widths of lanes and shoulders, as well as permitted speeds in different sections. The classification of the highway varies from main arterial to secondary arterial, depending on the flow of vehicles and the characteristics of the cities it passes through. Traffic data collected in 2018 and 2020 reveal seasonal flow patterns, with a predominance of passenger and commercial vehicles. The Federal Government has made significant investments in the recovery and maintenance of BR-122, improving the road's trafficability and safety conditions. The study concludes by emphasizing the economic importance of BR-122 for the interior of Ceará and its contribution to regional development. The data and information presented in this study also provide a relevant basis for future research on this essential highway for the state.

KEY WORDS: Highway; Flexible pavement; BR-122; Road recovery; Asphalt pavement.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *campus* Quixadá, e-mail: joazysousa1@gmail.com



INTRODUÇÃO

A BR-122 é uma rodovia que foi construída e mantida pelo Governo Federal, possuindo uma extensão de 1840 Km. É classificada como longitudinal, cortando o Brasil no sentido norte-sul.

A rodovia tem início no estado do Ceará, na cidade de Chorozinho seguindo em direção sul do estado e tem seu término no Estado de Minas Gerais. O trecho 122/CE termina na divisa com Pernambuco. No Estado do Ceará, a estrada passa pelas cidades de Ocara, Ibaratama, Quixadá, Banabuiú até chegar em Caririáçu.

Ela cruza boa parte do Brasil e transpassa por vários estados e municípios. Sendo assim, é uma rodovia de extrema importância, pois serve de ligação entre as regiões norte e as regiões centro-sul do Estado do Ceará, sendo denominada como corredor logístico, pois o tráfego de pessoas e mercadorias para o interior é intenso. Quanto à pavimentação asfáltica, em diversos trechos não há implantação desse tipo de infraestrutura.

A rodovia é fiscalizada pelo departamento de Polícia de Rodoviária Federal (PRF), e monitorada por meio de radares e fotossensores. Sua manutenção é gerenciada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, autarquia federal vinculada ao Ministério da Infraestrutura.

CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DO SEGMENTO

O segmento que este trabalho se propôs analisar é de aproximadamente 56,51 km, o qual inicia na cidade de Banabuiú-CE e segue até a cidade de Quixadá-CE. As informações referentes ao segmento analisado são as seguintes:

- Rodovia: BR-122 / CE
- Trecho: Entroncamento BR-116 (Chorozinho) – Entroncamento CE-494 (Div CE/PE)
- Subtrecho: Entroncamento CE-060 / 265 (Quixadá) – Início pista dupla Banabuiú
- Segmento: km 98,00 ao km 154,51
- Extensão: 56,21 km



Figura 1. Localização do trecho caracterizado (DNIT, 2020)



DOI: [10.29327/1430212.49-109](https://doi.org/10.29327/1430212.49-109)

ESTUDO DE CASO DA CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA E MANUTENÇÃO DA RODOVIA BR-122:
TRECHO QUIXADÁ-BANABUIÚ

Na figura 1, pode-se ver no mapa o seguimento analisado, em lilás. É classificada como pista simples, de duas faixas, com pavimento asfáltico. Passa a ser pista dupla na entrada da cidade de Banabuiú.

As velocidades dessa rodovia variam de acordo com as características dos trechos percorridos. A velocidade em Leito Natural (LN) é de 40 quilômetros por hora (km/h); a velocidade em Revestimento Primário (RP) é de 50 km/h e em trecho Pavimentado (P) é de 60 km/h.

Podemos tratar desta caracterização técnica com a subdividindo o segmento km 98,00 ao km 154,51 da seguinte forma: km 98,00 ao km 113,90 e km 113,90 ao km 154,51. Isto porque estes dois segmentos possuem algumas características distintas um do outro.

km 98,00 ao km 113,90:

- Coordenadas: $-4^{\circ}57'50,7''$ S $38^{\circ}59'51,6''$ W / $-5^{\circ}04'18,6''$ S $-39^{\circ}03'49,1''$ W
- N (Valor do Número de Repetições do Eixo Padrão calculado para o período de Projeto 5 anos) = $4,2E+06$
- VMD (Volume médio diário total) = 1815
- VMDc (Volume médio diário comercial) = 745
- Revestimento faixa de rolamento: Concreto Betuminoso Usinado à Quente com espessura de 5 cm
- Revestimento acostamento: Concreto Betuminoso Usinado à Quente com espessura de 5 cm.

km 113,90 ao km 154,51:

- Coordenadas: $-5^{\circ}04'18,6''$ S $-39^{\circ}03'49,1''$ W / $-5^{\circ}18'01,7''$ S $-38^{\circ}55'12,3''$ W
- N (Valor do Número de Repetições do Eixo Padrão calculado para o período de Projeto 5 anos) = $6,7E+05$
- VMD (Volume médio diário total) = 620
- VMDc (Volume médio diário comercial) = 134
- Revestimento: Tratamento Superficial Duplo com espessura de 2 a 3 cm
- Revestimento acostamento: Base

Informações mais detalhadas sobre todo o segmento analisado podem ser vistos na Figura 2, onde constam dimensões sobre pista de rolamento e acostamento.



Rodovia	Segmento			Remendo Profundo RP (m ²)	Características da Pista								Observação	
	Nº	km Inicial	km Final		Pista				Acostamento					
					Extensão (km)	Largura (m)	Nº de Faixas	Tipo	Lado Esquerdo		Lado Direito			
									Extensão (km)	Largura (m)	Extensão (km)	Largura (m)		
Subtrecho: ENTR CE-060(A)/265 (QUIXADÁ) - INÍCIO PISTA DUPLA BANABUIÚ														
BR-122/CE	1	98,00	96,10	30,00	0,10	20,5	2	PS						ROTÁTORIA
BR-122/CE	2	98,10	101,07	200,00	2,97	6,1	2	PS	2,97	1,5	2,97	1,5		
BR-122/CE	3	101,07	103,87	250,00	2,80	6,1	2	PS	2,80	1,5	2,80	1,5		
BR-122/CE	4	103,87	104,07	60,00	0,20	23,0	2	PS						ROTÁTORIA
BR-122/CE	5	104,07	104,57	120,00	0,50	6,1	2	PS	0,50	1,5	0,50	1,5		
BR-122/CE	6	104,57	104,72	100,00	0,15	17,2	4	PS	0,15	3,0	0,15	3,0		POLÍCIA ESTADUAL
BR-122/CE	7	104,72	107,37	250,00	2,65	6,1	2	PS	2,65	1,6	2,65	1,6		
BR-122/CE	8	107,37	110,37	250,00	3,00	6,1	2	PS	3,00	1,6	3,00	1,6		
BR-122/CE	9	110,37	113,10	230,00	2,73	6,1	2	PS	2,73	1,6	2,73	1,6		
BR-122/CE	10	113,10	113,39	70,00	0,29	12,9	2	PS						ENTR. CE-060
BR-122/CE	11	113,39	116,37	700,00	2,98	6,0	2	PS	2,98	1,5	2,98	1,5		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	12	116,37	119,37	700,00	3,00	6,0	2	PS	3,00	1,5	3,00	1,5		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	13	119,37	122,37	700,00	3,00	6,0	2	PS	3,00	1,5	3,00	1,5		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	14	122,37	125,07	1000,00	2,70	6,0	2	PS	2,70	1,5	2,70	1,5		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	15	125,07	127,87	1000,00	2,80	6,0	2	PS	2,80	1,3	2,80	1,3		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	16	127,87	130,87	1000,00	3,00	6,0	2	PS	3,00	1,3	3,00	1,3		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	17	130,87	133,87	1000,00	3,00	6,0	2	PS	3,00	1,3	3,00	1,3		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	18	133,87	136,87	1000,00	3,00	6,0	2	PS	3,00	1,3	3,00	1,3		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	19	136,87	139,87	1000,00	3,00	6,0	2	PS	3,00	1,3	3,00	1,3		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	20	139,87	142,87	1000,00	3,00	6,0	2	PS	3,00	1,3	3,00	1,3		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	21	142,87	145,87	1000,00	3,00	6,0	2	PS	3,00	1,3	3,00	1,3		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	22	145,87	148,87	1000,00	3,00	6,0	2	PS	3,00	1,3	3,00	1,3		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	23	148,87	151,87	1000,00	3,00	6,0	2	PS	3,00	1,3	3,00	1,3		TRECHO EM TSD
BR-122/CE	24	151,87	154,51	1000,00	2,64	6,0	2	PS	2,64	1,3	2,64	1,3		TRECHO EM TSD

Figura 2. Características da faixa de rolamento e acostamento (DNIT, 2020)

Nota-se que as larguras de cada faixa em pista contínua variam entre 3m e 3,05m. Já os acostamentos variam entre 1,3m e 1,6m. Os pontos com larguras maiores que estas tratam-se de rotatórias, alças, entroncamentos etc.

A rodovia BR-122 é do tipo arterial principal em quase todo seu seguimento, uma vez que foi construída para prover mobilidade de pessoas e mercadorias de outros estados. Já no segmento escolhido, ela passa a ser melhor classificada como do tipo arterial primário, quando seu fluxo é oriundo do trecho Quixadá até a rotatória para Banabuiú (km 98,00 ao km 113,90). Neste trecho, ela se encontra com a CE-265, como é possível identificar na Figura 3, circulado em azul.

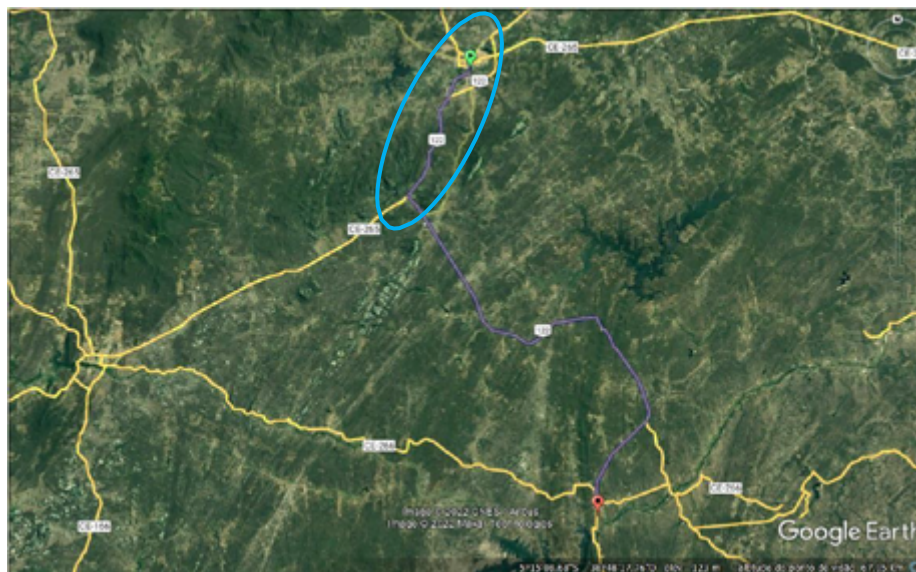


Figura 3. Imagem de satélite do trecho analisado (Google Earth, 2022)



DOI: 10.29327/1430212.49-109

ESTUDO DE CASO DA CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA E MANUTENÇÃO DA RODOVIA BR-122:
TRECHO QUIXADÁ-BANABUIÚ

Já o trecho que segue da rotatória até a cidade de Banabuiú (km 113,90 ao km 154,51) classifica-se do tipo arterial secundário, pois além de propiciar acesso às cidades que nela se conectam, seu fluxo de veículos tem uma redução considerável.

Nestas classificações, se levou também em consideração a quantidade de habitantes que essas cidades possuem. No caso do trecho que se encontra na cidade de Quixadá, a qual possui um total de 84168 habitantes, a classificação como arterial principal se torna adequada e corresponde ao fluxo na rodovia de forma proporcional. Já na cidade de Banabuiú, a qual contém 17195 habitantes, o trecho da BR-122 tem uma redução considerável no tráfego.

A extensão de todo o segmento se enquadra em 2% a 5% da rede. Seu serviço corresponde a 10 a 20% vpd.km e a extensão média de viagens é de 60km com uma velocidade de operação de 40 a 80 km/h.

Dados foram coletados pelo Plano Nacional de Contagem de Tráfegos (PNCT) no ano de 2018, que estão presentes na Figura 4. Nela percebe-se que há uma predominância do fluxo de veículos de passeio, no trecho da BR-122 que passa pela cidade de Banabuiú.

Expansão Anual							
Fonte de Dados:		PNCT					
Rodovia:		BR-226/CE					
Local:		km 220					
Sentido:		Bidirecional					
Ano:		2018					
Dia da Semana		Volume Diário			Fator de Expansão Sazonal		
		Passeio	Comercial	Total	Passeio	Comercial	Total
1	Janeiro	1.689	159	1.848	0,9201	1,0203	0,9288
2	Fevereiro	1.606	160	1.766	0,9677	1,0139	0,9719
3	Março	1.551	165	1.716	1,0020	0,9832	1,0002
4	Abril	1.504	147	1.651	1,0333	1,1036	1,0396
5	Maio	1.507	150	1.657	1,0313	1,0815	1,0358
6	Junho	1.514	157	1.671	1,0265	1,0333	1,0271
7	Julho	1.497	158	1.655	1,0382	1,0267	1,0371
8	Agosto	1.503	171	1.674	1,0340	0,9487	1,0253
9	Setembro						
10	Outubro						
11	Novembro	1.616	193	1.809	0,9617	0,8405	0,9488
12	Dezembro						
Volume Médio Diário Anual 1905		1.554	162	1.716			

Figura 4. Volume de tráfego (DNIT, 2020)

Os dados da Figura 4, referentes aos volumes diários totais para cada mês, foram plotados no Gráfico 1. Tem-se que, nos meses finais do ano para os meses iniciais do ano seguinte, há um maior fluxo, o qual permanece praticamente constante ao longo dos outros meses.

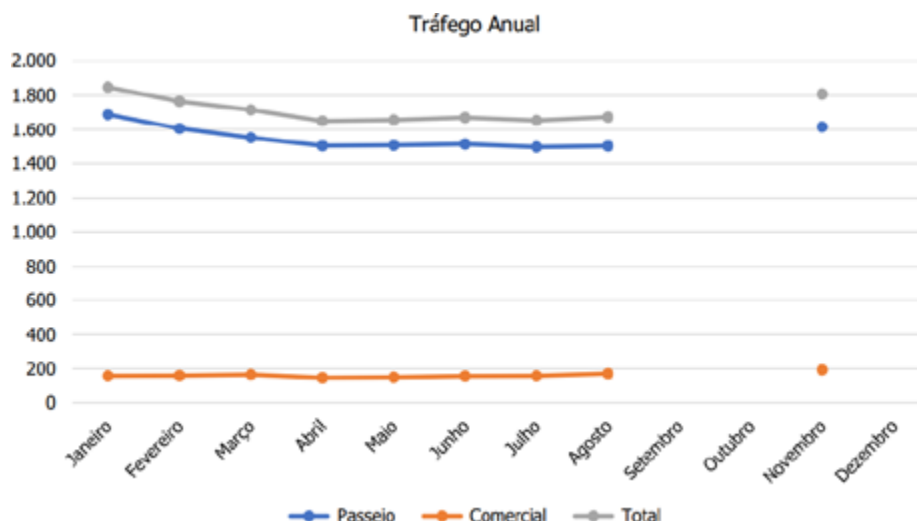


Gráfico 1. Evolução do tráfego em 2018 (DNIT, 2020)

As características dos tipos de veículos podem ser consultadas na Figura 5, construída a partir da coleta de tráfego feita no mês de fevereiro de 2020, pela Polícia Rodoviária Estadual, localizada no km 105. Nota-se que, por este trecho, há uma leve predominância de fluxo de veículos do tipo comercial. Ressalta-se que o km 105 fica localizado dentro do segmento km 98,00 ao km 113,90, onde foi constatado um tráfego mais acentuado que no segundo (km 113,90 ao km 154,51).

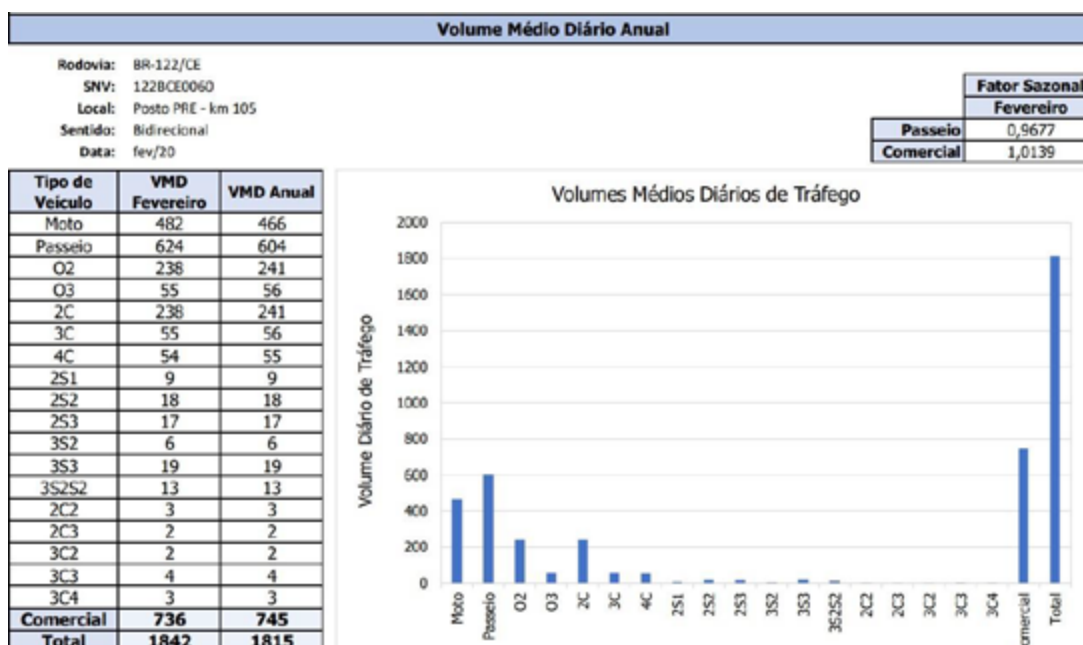


Figura 5. Volume médio diário anual (DNIT, 2020)

Em 2020, através do Programa de Recuperação e Manutenção Rodoviária (CREMA) do DNIT, o Governo Federal iniciou a recuperação desse trecho da BR-122, o qual foi finalizado em 2021. O



DOI: 10.29327/1430212.49-109

ESTUDO DE CASO DA CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA E MANUTENÇÃO DA RODOVIA BR-122:
TRECHO QUIXADÁ-BANABUIÚ

trecho localizado entre o km 98,00 e km 154,51 melhorou as condições de trafegabilidade da malha rodoviária no estado do Ceará.

Nas Figuras 6 e 7, tem-se as soluções de cada subtrecho que foram adotadas para as faixas de rolamento e para os acostamentos do trecho recuperado.

QUANTITATIVOS - PERCENTUAL																	
BR	Segmento				RP	SOLUÇÃO ADOTADA PARA PISTA (%)											
	Nº	km Inicial	km Final	Extensão (km)		FR (4,0) PISTA	Tipo Fresagem PISTA	RB (25% BRITA) TSD (2) CBUQ - FAIXA C (5)	RB (25% BRITA + 3% CIMENTO) TSD (2) CBUQ - FAIXA C (5)	RB (25% BRITA) TSD (2)	RB (25% BRITA + 3% CIMENTO) TSD (2)	CBUQ FAIXA C 3,0	CBUQ FAIXA C 4,5	CBUQ FAIXA C 5,0	CBUQ FAIXA C 6,5	CBUQ FAIXA C 7,0	CBUQ FAIXA C 8,0
BR-122/CE	1	98,000	98,100	0,100	1,461%	100%	Cont.					100%					
BR-122/CE	2	98,100	101,070	2,970	0,740%	100%	Cont.							100%			
BR-122/CE	3	101,070	103,870	2,800	0,981%	100%	Cont.										100%
BR-122/CE	4	103,870	104,070	0,200	1,305%	100%	Cont.										100%
BR-122/CE	5	104,070	104,570	0,500	2,637%			100%									
BR-122/CE	6	104,570	105,220	0,650	2,879%			100%									
BR-122/CE	7	104,220	107,370	2,650	1,025%				100%								
BR-122/CE	8	107,370	110,570	3,000	0,905%	100%	Cont.					100%					
BR-122/CE	9	110,570	113,300	2,730	0,916%	100%	Cont.					100%					
BR-122/CE	10	113,300	113,390	0,290	1,868%	100%	Cont.							100%			
BR-122/CE	11	113,390	116,370	2,980	2,610%					100%							
BR-122/CE	12	116,370	119,370	3,000	2,593%					100%							
BR-122/CE	13	119,370	122,370	3,000	2,593%					100%							
BR-122/CE	14	122,370	125,070	2,700	4,115%					100%							
BR-122/CE	15	125,070	127,870	2,800	4,153%						100%						
BR-122/CE	16	127,870	130,870	3,000	3,876%						100%						
BR-122/CE	17	130,870	133,870	3,000	3,876%				33%								
BR-122/CE	18	133,870	136,870	3,000	3,876%									48%			
BR-122/CE	19	136,870	139,870	3,000	3,876%									42%			
BR-122/CE	20	139,870	142,870	3,000	3,876%												
BR-122/CE	21	142,870	145,870	3,000	3,876%												
BR-122/CE	22	145,870	148,870	3,000	3,876%												
BR-122/CE	23	148,870	151,870	3,000	3,876%												
BR-122/CE	24	151,870	154,510	2,640	4,405%												

Figura 6. Soluções adotadas para a faixa de rolamento (DNIT, 2020)

QUANTITATIVOS - PERCENTUAL														
BR	Segmento				ACOSTAMENTO Lado Esquerdo					ACOSTAMENTO Lado Direito				
	Nº	km Inicial	km Final	Extensão (km)	RB (25% BRITA) TSD (2)	RB (25% BRITA + 3% CIMENTO) TSD (2)	TSD	CBUQ FAIXA B 4,0	CBUQ FAIXA B 5,0	RB (25% BRITA) TSD (2)	RB (25% BRITA + 3% CIMENTO) TSD (2)	TSD	CBUQ FAIXA B 4,0	CBUQ FAIXA B 5,0
BR-122/CE	1	98,000	98,100	0,100										
BR-122/CE	2	98,100	101,070	2,970				100%					100%	
BR-122/CE	3	101,070	103,870	2,800				100%					100%	
BR-122/CE	4	103,870	104,070	0,200										100%
BR-122/CE	5	104,070	104,570	0,500	100%							100%		
BR-122/CE	6	104,570	104,720	0,150	100%							100%		
BR-122/CE	7	104,720	107,370	2,650		100%						100%		
BR-122/CE	8	107,370	110,370	3,000			100%					100%		
BR-122/CE	9	110,370	113,100	2,730			100%					100%		
BR-122/CE	10	113,100	113,390	0,290										
BR-122/CE	11	113,390	116,370	2,980	100%							100%		
BR-122/CE	12	116,370	119,370	3,000	100%							100%		
BR-122/CE	13	119,370	122,370	3,000	100%							100%		
BR-122/CE	14	122,370	125,070	2,700	100%							100%		
BR-122/CE	15	125,070	127,870	2,800		100%						100%		
BR-122/CE	16	127,870	130,870	3,000		100%						100%		
BR-122/CE	17	130,870	133,870	3,000	33%						33%			
BR-122/CE	18	133,870	136,870	3,000		48%					48%			
BR-122/CE	19	136,870	139,870	3,000		42%					42%			
BR-122/CE	20	139,870	142,870	3,000	7%						7%			
BR-122/CE	21	142,870	145,870	3,000	70%						70%			
BR-122/CE	22	145,870	148,870	3,000	69%						69%			
BR-122/CE	23	148,870	151,870	3,000	67%						67%			
BR-122/CE	24	151,870	154,510	2,640	68%						68%			

Figura 7. Soluções adotadas para o acostamento (DNIT, 2020)

O investimento foi de R\$ 23,7 milhões e incluiu serviços de fresagem (FR), com aplicação de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ); de reciclagem de base (RB), com Tratamento Superficial Duplo (TSD); drenagem e sinalização da via. Com a pista restaurada, as equipes do DNIT realizam os demais serviços de manutenção, como roçada, capina, caiação, limpeza e



desobstrução de dispositivos de drenagem. Alguns exemplos dos serviços são mostrados nas Figuras a seguir.



Figura 8. Execução de CBUQ (AUTOR, 2021)



Figura 9. Execução de TSD (AUTOR, 2021)

DOI: [10.29327/1430212.49-109](https://doi.org/10.29327/1430212.49-109)ESTUDO DE CASO DA CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA E MANUTENÇÃO DA RODOVIA BR-122:
TRECHO QUIXADÁ-BANABUIÚ

Figura 10. Execução de reciclagem de base (AUTOR, 2021)

Nota-se, na Figura 11, registradas no km 130,2, o trecho antes da restauração e depois da restauração.



Figura 11. Recuperação da BR-122 (DNIT, 2020)

CONCLUSÃO

Devido a importância da BR-122 para a economia do interior do Ceará, suas condições e estabilidade precisam ser observadas com a devida atenção do Estado, o que vem sendo feito recentemente. Com essa rodovia grande parte do fluxo da BR-116 migra para a BR-122, e tê-la transpassando cidades como Quixadá, uma cidade de com mais de 84 mil habitantes, a torna necessária para o desenvolvimento da região central do Estado. O trabalho possibilitou a realização da caracterização da rodovia trecho da CE-265. Os dados coletados e expostos se tornam relevantes para auxilia outros pesquisadores na coleta de informações técnicas, históricas e geográficas sobre essa importante rodovia do Estado.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Governo Federal. **Governo Federal entrega 56 quilômetros restaurados da BR-122/CE**. Brasília: Min. Infraestrutura, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/pt-br/assuntos/noticias/2021/4/governo-federal-entrega-56-quilometros-restaurados-da-br-122-ce#:~:text=O%20Governo%20Federal%20finalizou%20a,rodovi%C3%A1ria%20no%20estado%2>. Acesso em: 27 fev. 2022.

CNT: SEST/SENAT (Brasil). **Pesquisa CNT de Rodovias**. Brasília: Sest/Senat, 2019. Disponível em: https://pesquisarodovias.cnt.org.br/Downloads/Edicoes//2019/Relat%C3%B3rio%20Gerencial/Relatorio_Gerencial_Pesquisa_CNT_Rodovias_2019.pdf. Acesso em: 27 fev. 2022.

CNT: SEST/SENAT (Brasil). **Pesquisa CNT de Rodovias**. Brasília: SEST/SENAT, 2021. Disponível em: https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/Pesquisa_CNT_Rodovias_2021_Web.pdf. Acesso em: 27 fev. 2022.

DNIT (Brasil). Ministério de Infraestrutura. **Termo de compromisso**. Brasília: DNIT, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/meio-ambiente/regularizacao-ambiental/termos-de-compromisso/tc-br-122-com-508-0-km-de-extensao.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2022.

DNIT (Brasil). Ministério de Infraestrutura. **Projeto referencial programa crema**. Brasília: DNIT, 2020. 782 p.

PINTO, Cleumio. **BR-122 corta Quixadá e diminui percurso do Ceará para sudeste e sul do país**. 2017. Disponível em: <https://www.sertaoalerta.com.br/09/03/2017/br-122-corta-quixada-e-diminui-percurso-do-ceara-para-suldeste-e-sul-do-pais/>. Acesso em: 27 fev. 2022.

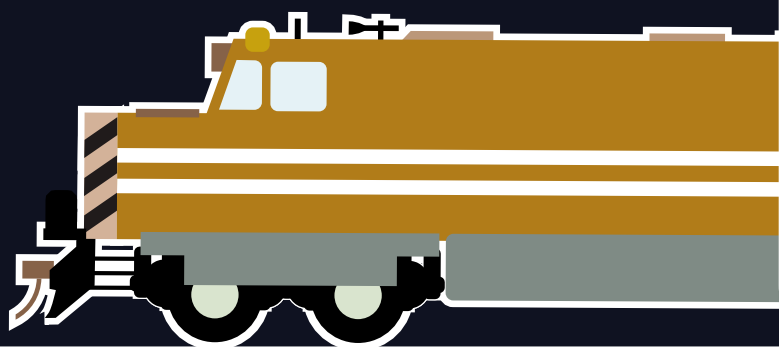


26° Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br



ABDER



**GESTÃO E MELHORIA NA
INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA:
PARÂMETROS, MODELAGEM E
PROCEDIMENTOS**

PROGRAMAÇÃO
TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS E ESTUDOS DE CASOS DE OBRAS
Quarta-feira, 21 de agosto

SALA CAUEIRA			
GESTÃO E MELHORIA NA INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA: PARÂMETROS, MODELAGEM E PROCEDIMENTOS (ST08)			
⌚	11:00	EC379	ANÁLISE COMPARATIVA DE SOFTWARES DE MODELAGEM DE TRÁFEGO APLICADO EM AMBIENTE URBANO
⌚	11:20	EC350	ESTUDO DE CASO ANTEPROJETO X CONTRATAÇÃO INTEGRADA INTERSEÇÃO EM DESNÍVEL NA RODOVIA BR-376/PR, CRUZAMENTO COM PR-317, EM MARINGÁ/PR
⌚	11:40	TT997	PROPOSTAS DE MELHORIAS PARA REMUNERAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE TRÁFEGO EM OBRAS RODOVIÁRIAS
⌚	12:00	TT629	PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA PERÍCIA NAS DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTES EM OBRAS RODOVIÁRIAS



ANÁLISE COMPARATIVA DE SOFTWARES DE MODELAGEM DE TRÁFEGO APLICADO EM AMBIENTE URBANO

Marcelo Franco Porto ¹, Cleide Maria Martins ¹, Rafael Augusto Santos de Souza ¹, Marina Vasconcelos de Paula e Silva ¹, Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli ¹

RESUMO

Este estudo destaca a importância do planejamento urbano eficiente e da infraestrutura urbana para a implementação de cidades inteligentes. Ele se concentra na utilização de softwares de simulação de trânsito – InfraWorks, Aimsun e PTV Vissim – como ferramentas importantes para a tomada de decisões e planejamento de transporte urbano. A pesquisa foi realizada no Anel Rodoviário Celso Mello Azevedo, em Belo Horizonte/Minas Gerais, com o objetivo de apoiar um novo planejamento urbano na via. O estudo permitiu identificar padrões de circulação, tempos de viagem, congestionamentos e outros aspectos relevantes para a gestão do tráfego urbano. Os softwares foram avaliados em termos de eficiência e os resultados foram comparados. As simulações permitiram antecipar os impactos futuros na rede urbana viária e gerar gráficos comparativos dos resultados. Essas informações são determinantes para a elaboração de políticas de planejamento de transporte e infraestrutura viária na região estudada. O PTV Vissim se destacou como o mais completo, enquanto o Aimsun tem qualidade semelhante, mas com limitações. A vantagem do InfraWorks é sua integração com o Building Information Modeling (BIM). Isso permite uma interação mais eficiente e detalhada com modelos de construção e planejamento, possibilitando uma melhor visualização e análise das infraestruturas urbanas. O InfraWorks apresenta outra vantagem: sua facilidade de uso, que proporciona uma visão detalhada do projeto em etapas importantes, como concepção e planejamento, tornando-o extremamente útil para projetos de infraestrutura, garantindo um fluxo eficiente, evitando erros e economizando tempo ao longo do ciclo de vida do projeto.

PALAVRAS-CHAVES: Softwares; Simulação; InfraWorks, Aimsun e PTV Vissim.

ABSTRACT

This study highlights the importance of efficient urban planning and infrastructure for implementing smart cities. It focuses on using traffic simulation software, InfraWorks, Aimsun, and PTV Vissim, as crucial tools for decision-making and urban transportation planning. The research was conducted in the Celso Mello Azevedo Ring Road, in Belo Horizonte/Minas Gerais, aiming to support new urban planning on the road. The study identified traffic circulation patterns, travel times, congestion, and other relevant aspects for urban traffic management. The software was evaluated for efficiency, and results were compared, enabling anticipation of future impacts on the urban road network and generating comparative graphics. This information is crucial for developing transportation and road infrastructure policies in the studied region. PTV Vissim stood out as the most comprehensive, while Aimsun had similar quality but with limitations. InfraWorks' advantage lies in its integration with Building Information Modeling (BIM). This allows for a more efficient and detailed interaction with construction and planning models, enhancing visualization and analysis of urban infrastructures. InfraWorks has another advantage: it is easy to use. This provides a detailed view of the project at important stages, such as conception and planning, making it extremely useful for infrastructure projects, ensuring an efficient flow, avoiding errors and saving time throughout the project lifecycle.

KEY WORDS: Software; Simulation; InfraWorks, Aimsun, and PTV Vissim.

¹ Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG: marcelo@etgufmg.br; emmengenheiracivil@yahoo.com, ra2361982@ufmg.br, marinavps@yahoo.com.br beltrao.bruna@gmail.com



1 INTRODUÇÃO

Simuladores de tráfego urbano são ferramentas computacionais utilizadas para modelar e analisar o fluxo de veículos, pedestres e outras formas de transporte em ambientes urbanos. Esses softwares são projetados para reproduzir o comportamento dinâmico dos agentes de trânsito, permitindo simular diversas situações e cenários para a análise e otimização do sistema de transporte. A análise do tráfego urbano envolve a compreensão de como o fluxo de veículos interage com as vias, interseções, semáforos, faixas exclusivas, estacionamentos e outras infraestruturas urbanas. Com os simuladores de tráfego, é possível modelar essas estruturas em um ambiente virtual e simular o movimento dos veículos ao longo do tempo (BARCELÓ, 2010).

Os simuladores de tráfego urbano são amplamente utilizados por planejadores de transporte, engenheiros de tráfego, pesquisadores e autoridades de transporte para tomar decisões informadas e otimizar o sistema de transporte de uma cidade. Por meio da modelagem computacional, eles permitem a simulação do comportamento dos agentes de trânsito e a geração de análises precisas e detalhadas, auxiliando na tomada de decisões informadas para a melhoria da mobilidade urbana (ANTONIOU *et al.*, 2014).

De acordo com Delaneze *et al.* (2014), a modelagem urbana se baseia em conceitos fundamentais que orientam a representação e a simulação do sistema de transporte urbano. Esses conceitos envolvem a compreensão dos padrões de comportamento dos usuários, a interação entre os elementos do sistema e a captura dos processos e fenômenos relevantes. Alguns princípios comuns da modelagem urbana são comportamento dos usuários, interação entre os diferentes elementos do sistema de transporte urbano e representação espacial e temporal.

Existem três tipos de simulação: microscópica, macroscópica e mesoscópica. Na simulação microscópica de transporte urbano, os veículos são tratados de forma individualizada. Os modelos são detalhados e consideram características específicas de cada veículo, como tamanho, localização, velocidade, aceleração e comportamento do motorista. Essa abordagem permite uma representação minuciosa das interações entre os veículos e a análise de eventos individuais, como mudanças de faixa, manobras, frenagens e acelerações (KAWAMOTO, 2010).

Segundo Barceló (2012), na simulação macroscópica, o fluxo de tráfego é concebido de forma agregada, sem levar em consideração a individualidade dos veículos. O modelo é baseado na descrição do fenômeno de ondas de choque, utilizando conceitos da hidrodinâmica. Nessa abordagem, os veículos são considerados como um fluxo contínuo e são analisados em termos de densidade, velocidade média, taxa de fluxo e congestionamento. A simulação mesoscópica busca fazer uma abordagem dos veículos de forma agrupada com características semelhantes, como tamanho, localização, velocidade e aceleração. Esses grupos são tratados como modelos únicos, permitindo uma simulação mais eficiente analisando o comportamento coletivo dos veículos e os efeitos de interações entre grupos de veículos.

Para essa pesquisa, foi utilizado o modelo de análise microscópica para analisar a região dos viadutos sobre o Anel Rodoviário para acesso à BR-040 sentido Brasília, observando os períodos da manhã e da tarde e dois dias específicos. Os dados foram obtidos a partir do banco de dados do Departamento de Estradas de Rodagem (DER).



DOI: [10.29327/1430212.49-79](https://doi.org/10.29327/1430212.49-79)

ANÁLISE COMPARATIVA DE SOFTWARES DE MODELAGEM DE TRÁFEGO APLICADO EM AMBIENTE URBANO

O presente estudo tem como objetivo a comparação entre três softwares de simulação de tráfego (Aimsun, PTV Vissim e InfraWorks), apresentando os pontos positivos e pontos de melhoria de cada um e explorando as funcionalidades presentes em cada um deles. O estudo foi motivado pelo crescente uso de simuladores de tráfego em projetos para ambientes urbanos.

2 SIMULADORES DE TRÁFEGO

Os simuladores de tráfego utilizam algoritmos e modelos matemáticos para representar o comportamento dos agentes de trânsito, como aceleração, desaceleração, mudança de faixa, escolha de rota, interação com semáforos e outras decisões relevantes para a análise do tráfego urbano. No processo de geração da análise de tráfego, os simuladores consideram diversos fatores, tais como modelagem da rede viária, comportamento do motorista, dados de entrada, simulação temporal e avaliação de resultados. Para Portugal (2005), é importante ressaltar que a qualidade e precisão dos resultados gerados pelos simuladores de tráfego dependem da qualidade dos dados de entrada, da calibração adequada dos modelos e da representação fiel do comportamento dos agentes de trânsito. A capacidade de processamento computacional e a velocidade de simulação também são fatores importantes a serem considerados ao selecionar um simulador de tráfego adequado para cada contexto.

No entanto, os simuladores de tráfego urbano possuem algumas limitações. Eles dependem de suposições e simplificações para representar o comportamento dos agentes de trânsito, o que pode levar a desvios em relação à realidade. Além disso, a precisão dos resultados pode ser afetada pela qualidade dos dados de entrada e pelas configurações escolhidas durante a modelagem. Para cada software de simulação de tráfego urbano, é essencial considerar diversos fatores, como a capacidade de modelagem e simulação dos elementos específicos da infraestrutura viária da região de interesse, a facilidade de uso, a escalabilidade do software, a disponibilidade de suporte e as atualizações (SENNÁ, 2014).

2.1 Características dos Simuladores

As seções seguintes apresentam as principais características dos três simuladores de tráfego escolhidos para essa pesquisa: Aimsun, PTV Vissim e InfraWorks. Esses três simuladores foram escolhidos por serem amplamente utilizados na literatura estudada.

2.1.1 Aimsun

Aimsun é um software de modelagem de transporte comercial desenvolvido e comercializado pela Transport Simulation Systems (TSS), com sede em Barcelona, na Espanha. O software pode ser utilizado para diferentes tipos de redes de tráfego: redes urbanas, rodovias, rodoanéis, vias arteriais e quaisquer combinações entre elas (RONALDO E ISMAIL, 2012).

De acordo com os desenvolvedores do Aimsun, o software pode ser utilizado em todo o ciclo de vida dos sistemas de transportes. O Aimsun combina análise de dados, previsão e simulação para apoiar projetos de qualquer tamanho, escopo, cronograma e orçamento (AIMSUN, 2024).

Suas principais funcionalidades são modelagem de redes viárias, simulação de tráfego em tempo real, análise de capacidade e desempenho de vias, estimativa de tempos de percurso e atrasos, análise de



impacto de projetos de infraestrutura, análise de gestão de semáforos, integração com sistemas inteligentes de transporte e avaliação de cenários de planejamento.

2.1.2 PTV Vissim

PTV Vissim é um simulador microscópico baseado no comportamento individual dos veículos e é amplamente utilizado por engenheiros de tráfego na prática, bem como por pesquisadores para desenvolvimentos relacionados ao tráfego rodoviário. O VISSIM oferece uma interface gráfica amigável através da qual é possível projetar a geometria de qualquer tipo de rede rodoviária e definir simulações de maneira simples (TETTAMANTI E VARGA, 2012).

De acordo com PTV Group (2024), o PTV Vissim reproduz digitalmente os padrões de tráfego de todos os usuários da via em escala microscópica. Suas principais funcionalidades incluem avaliação do desempenho de infraestrutura de transportes, avaliação de sistemas inteligentes de transporte, simulação com pedestres e avaliação de emissões de poluentes e gases com efeito estufa.

2.1.3 Autodesk InfraWorks

O InfraWorks é um software de infraestrutura desenvolvido pela Autodesk. Ele permite modelagem, análise e visualização de conceitos de projeto de infraestrutura no contexto do ambiente natural e construído (AUTODESK, 2023a). O software oferece ferramentas para a criação de modelos detalhados de infraestruturas como estradas, pontes, edifícios, e redes de água e esgoto. Os usuários podem importar dados geoespaciais, como imagens de satélite, dados topográficos e informações de sistemas de informações geográficas (AUTODESK, 2023b).

O InfraWorks permite ainda que o usuário compartilhe projetos e modelos com outros usuários e computadores através de recursos em nuvem. Ele também é compatível com o AutoCAD Civil 3D. Dessa forma, é possível a troca de dados entre os dois programas, o que permite que o projeto seja iniciado no InfraWorks e finalizado no AutoCAD Civil 3D. Edifícios, árvores e outros elementos urbanos podem ser adicionados ao modelo 3D para criar uma visualização realista (AVRAMOVIC E JOHNSON, 2017).

Através dessa revisão bibliográfica, é possível observar que o InfraWorks não é um software desenvolvido para simulação de tráfego, mas pode ser utilizado com esse propósito.

3.0 METODOLOGIA

Para melhor compreensão do método utilizado, foi construído um framework do estudo em questão, com as etapas de coleta, compilação dos dados, calibração dos parâmetros, validação de hipóteses e análises de cada um dos quatro softwares supramencionados e selecionados para o trabalho. A Figura 1 elucidada este framework.



DOI: 10.29327/1430212.49-79

ANÁLISE COMPARATIVA DE SOFTWARES DE MODELAGEM
DE TRÁFEGO APLICADO EM AMBIENTE URBANO

FRAMEWORK

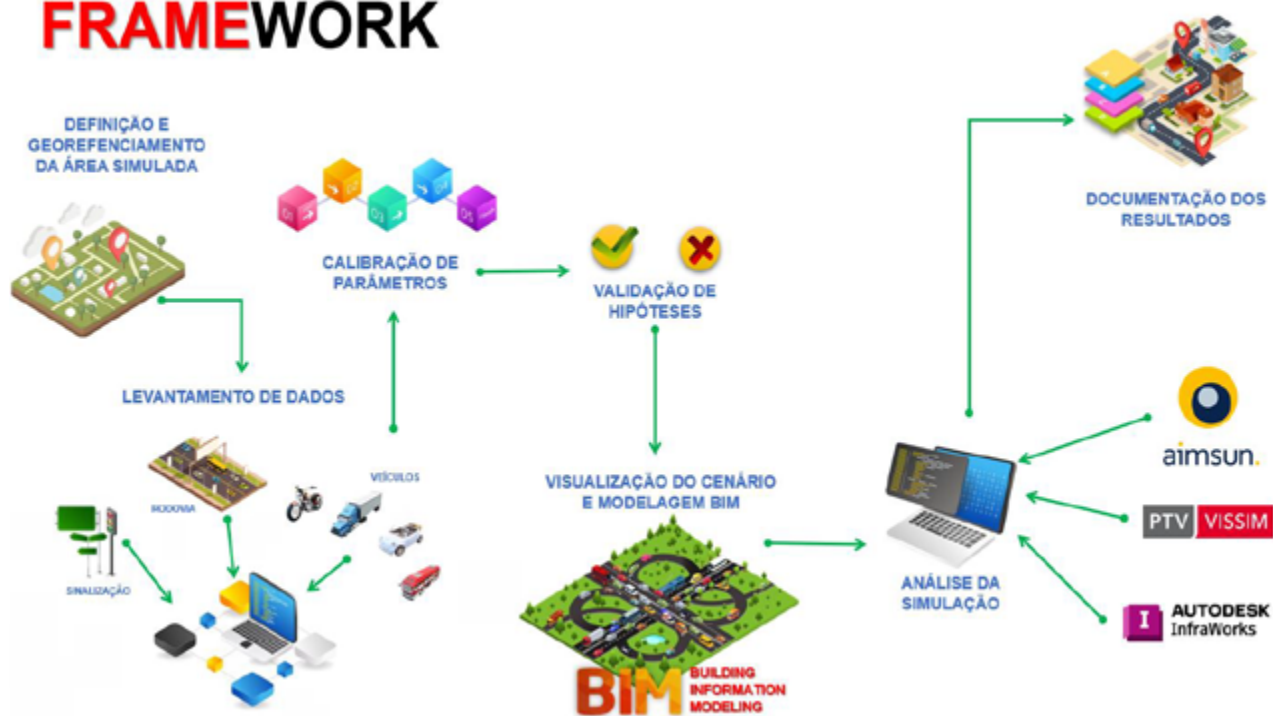


Fig. 1: Framework da pesquisa (Autores, 2024)

Primeira etapa: Determinação da área de estudo. O objeto de estudo escolhido foi o Anel Rodoviário Celso Mello Azevedo, em Belo Horizonte, Minas Gerais, em sua interseção com a Avenida Amazonas. O Anel Rodoviário é um importante instrumento de mobilidade da capital mineira, que dá vazão à porção de carga e transporte que, na década de 1950 passava pelo centro da cidade e causava aumento no trânsito e diversos tipos de transtornos.

A Avenida Amazonas, por sua vez, conecta o centro a outras cidades da Região Metropolitana, como Contagem e Betim. São duas vias com alto fluxo de veículos que têm um aumento significativo no seu fluxo durante o horário de pico, principalmente de pessoas que vêm de outras cidades para trabalhar em Belo Horizonte. A área é apresentada na Figura 2.

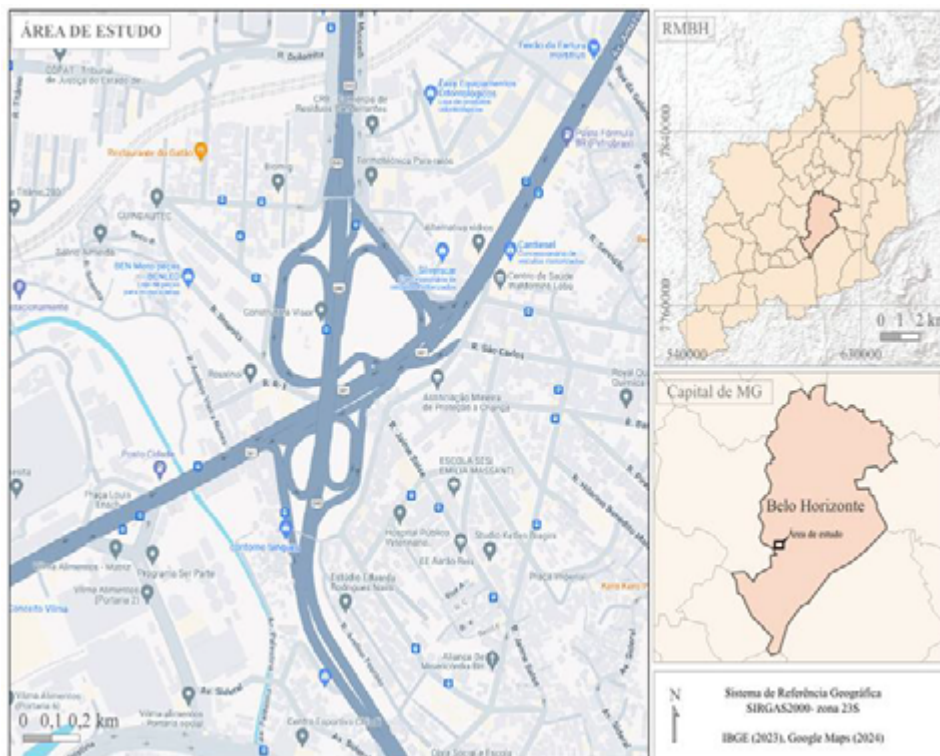


Fig. 2: Mapa da área objeto de estudo (Autores, 2024)

Uma vez definida esta área, foi importante realizar o seu georreferenciamento, ou seja, identificar a área geograficamente através das suas coordenadas.

Segunda etapa: Coleta e aquisição de dados. O passo seguinte diz respeito aos dados da via, relacionados à sua sinalização, direção dos fluxos, quantidade de veículos e outros pontos importantes que foram obtidos através do Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG).

Terceira etapa: Calibração de dados. Nessa fase os softwares foram ajustados a parâmetros específicos, como demanda de tráfego de acordo com dia e horários de funcionamento, ajuste na definição de quantas faixas ou alças são simuladas na área de estudo. A partir destas definições, foram criadas hipóteses:

1- Alteração das alças: Adicionando uma, duas ou três alças, poderia haver uma melhoria na redução do fluxo rodoviário.

2 - Escolhas dos dias/horários: Com base nos registros de contagem e na classificação viária do DER-MG, foram escolhidos os 2 dias da semana com maior demanda e comportamento expressivo do tráfego de trânsito. Os dias escolhidos foram terça-feira na parte da manhã e no fim de tarde e quarta-feira na parte da manhã e no fim da tarde. Segundo o DER-MG, os horários foram determinados devido à hipótese de que durante a manhã as pessoas estão se deslocando para escolas e para o trabalho.



[DOI: 10.29327/1430212.49-79](https://doi.org/10.29327/1430212.49-79)

ANÁLISE COMPARATIVA DE SOFTWARES DE MODELAGEM DE TRÁFEGO APLICADO EM AMBIENTE URBANO

No fim da tarde, as pessoas estão voltando para casa, o que aumenta o fluxo de veículos. É importante ressaltar que, por questões de complexidade e tempo de realização das simulações, foi determinado um recorte do objeto de estudo. Dessa forma, foi escolhido o horário de pico, terça-feira à tarde, devido à hipótese de que seria o horário mais crítico.

Quarta etapa: Desenvolvimento da modelagem. As vias foram modeladas aplicando o conceito Building Information Modeling (BIM) e utilizando as ferramentas BIM do software InfraWorks, para aperfeiçoar a análise e a modelagem digital tridimensional. Esse processo reúne informações gráficas e não gráficas para criar modelos 3D e integrar as informações em um ambiente de compartilhamento de dados acessível, transparente e intuitivo para o gerenciamento digital das informações do projeto. Em seguida, realizaram-se efetivamente as análises de testagem das hipóteses nos softwares de simulação de tráfego. Foi realizada uma simulação de tráfego com código aberto, priorizando flexibilidade e personalização.

O segundo software escolhido foi o Aimsun, que consegue fazer uma análise e modelagem avançada de transporte com integração de dados em tempo real.

O terceiro simulador utilizado foi o PTV Vissim, que é conhecido por sua precisão na simulação de interseções e controle de semáforos e recursos de modelagem avançada, tanto de pedestres como de vias urbanas.

Por fim, foi utilizado o Autodesk InfraWorks, que se destaca pela sua abordagem integrada BIM para planejamento urbano e design de infraestrutura, favorecendo a colaboração entre equipes multidisciplinares. Em síntese, os resultados da simulação de tráfego da via, obtidos por meio da utilização conjunta desses quatro softwares, oferecem uma visão abrangente e detalhada do comportamento do tráfego, permitindo análises precisas e embasadas para tomadas de decisão no planejamento e gestão de infraestruturas viárias.

4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS SOFTWARES

Após as análises, foram gerados os documentos que contribuíram para identificar os resultados de melhoria de fluxo das hipóteses testadas. O resultado esperado é a análise de pontos positivos e pontos limitantes ou de evolução de cada software, e não efetivamente os dados extraídos. O objetivo principal foi analisar se todos trariam resultados efetivos e questões acerca de interface, opções, ferramentas e interoperabilidade. As Figura 3 e 4 mostram análise realizada pelos 3 softwares no viaduto no dia mais crítico, terça-feira de manhã com as 3 alças.



Marcelo Franco Porto, Cleide Maria Martins, Rafael Augusto Santos de Souza, Marina Vasconcelos de Paula e Silva, Bruna Cristina Beltrão Silva Beilegoli

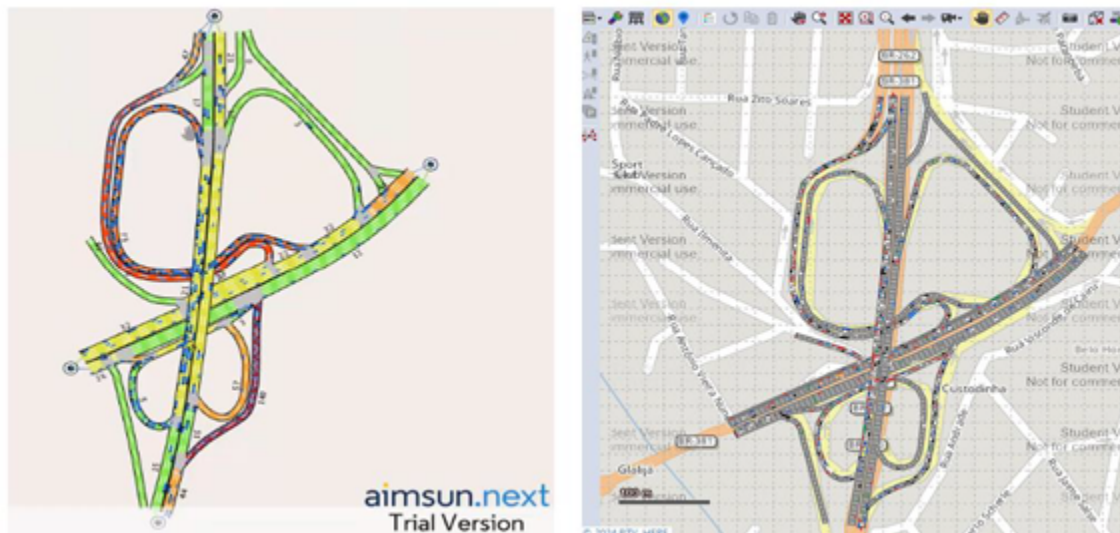


Fig. 3: Análise de terça-feira de manhã com as 3 alças com softwares Aimsun e Ptv Vissim (Autores, 2024)



Fig. 4: Análise de terça-feira de manhã com as 3 alças com software Autodesk InfraWorks 2024 (Autores, 2024)

4.2 Simulação no PTV Vissim, no Aimsun e no Autodesk InfraWorks

Conforme demonstrado na figura 7, foi aplicada regressão linear com intuito de destacar duas análises, velocidade média e tempo de congestionamento. Nesse cenário, os softwares PTV Vissim, Aimsun e Autodesk InfraWorks foram submetidos ao mesmo problema no pior cenário de fluxo viário intenso. Considerou-se as variáveis velocidade média em relação ao tempo de congestionamento e, a partir da simulação de 3 alças no viaduto, os 3 softwares apresentaram o mesmo desempenho com relação a velocidade. Porém, na análise de tempo de congestionamento, os softwares demonstram resultados diferentes com relação ao tempo de congestionamento médio variável. O PTV Vissim e o Aimsun tiveram resultado de tempo de congestionamento de 27 minutos, enquanto o Autodesk Infraworks apresentou um tempo de congestionamento entre 24 a 27 minutos, não sendo tão preciso.



DOI: 10.29327/1430212.49-79

ANÁLISE COMPARATIVA DE SOFTWARES DE MODELAGEM
DE TRÁFEGO APLICADO EM AMBIENTE URBANO

No PTV Vissim e no Aimsun é possível obter mais dados relevantes sobre o tempo de congestionamento, enquanto o Autodesk InfraWorks apresenta limitações na quantidade de informações.

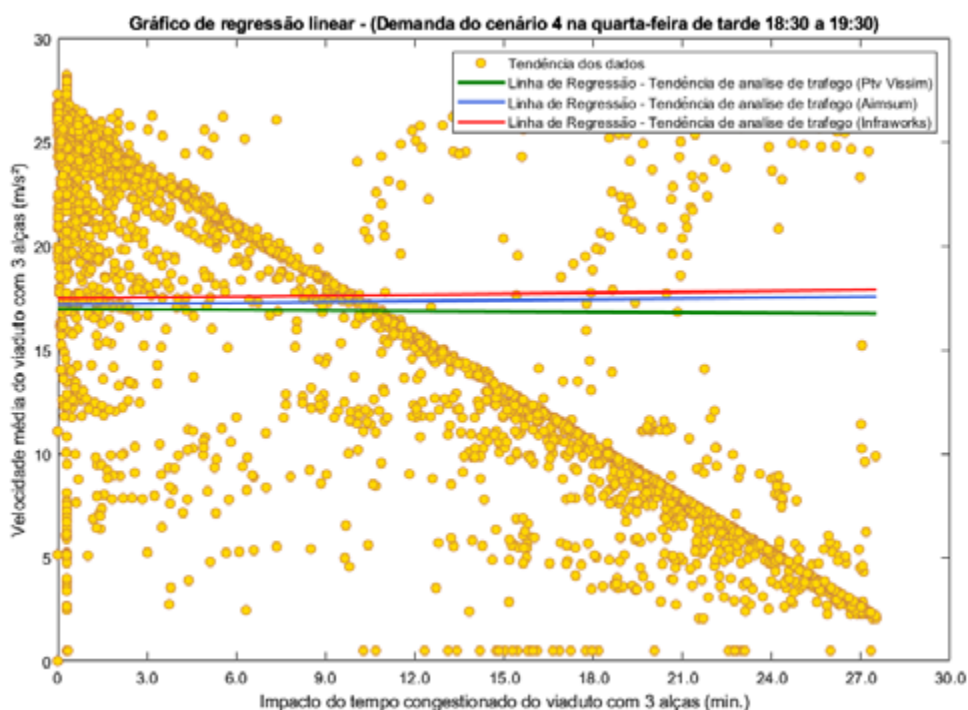


Fig. 7: Análise do pior caso cenário nos softwares PTV Vissim, Aimsun e InfraWorks (Autores, 2024)

As principais características destacadas foram: capacidade de potencial de entrega e resultados possíveis de cada software; pontos positivos do software quando comparado com os demais e pontos de evolução que, na análise dos autores, poderiam ser alterados para melhorar a sua operabilidade por profissionais da área. A Tabela 1 mostra esses pontos em uma análise macro de cada um deles.

Tabela 1 – Análise macro de características dos simuladores de tráfego (Autores, 2024)

<i>Software</i>	Capacidade	Pontos Positivos	Pontos de Evolução
Aimsun	Simulação de tráfego urbano e rodoviário	Possui uma ampla gama de recursos para modelagem e análise de tráfego	Pode exigir um período de aprendizado inicial para utilizar todas as funções
PTV Vissim	Simulação de tráfego em áreas urbanas e rodovias	Oferece uma interface amigável e intuitiva	Pode ser menos flexível em comparação com outros <i>softwares</i> simuladores
Autodesk InfraWorks	Simulação de tráfego em projetos de infraestrutura	Integração BIM com outros <i>softwares</i> da Autodesk para projetos de infraestrutura	Pode ser mais complexo para usuários inexperientes



A Tabela 2 apresenta uma análise das ferramentas e recursos que estão disponíveis dentro de cada um dos softwares, o que permite aos profissionais da área identificarem aquele que é mais aplicável para cada demanda no estudo de tráfego e mobilidade.

Tabela 2 – Funcionalidade dos simuladores de tráfego (Autores, 2024)

Funcionalidades	Aimsun	PTV Vissim	InfraWorks
Modelagem detalhada de redes viárias	Sim	Sim	Sim
Simulação de tráfego	Sim	Sim	Sim
Simulação de tráfego em tempo real	Sim	Sim	Não
Comportamento realista dos veículos	Sim	Sim	Sim
Análise de capacidade e desempenho das vias	Sim	Sim	Sim
Simulação de cenários de planejamento	Sim	Sim	Sim
Integração com sistemas de controle de tráfego	Sim	Sim	Não
Modelagem de transporte público	Sim	Sim	Sim
Análise de interseções e semáforos	Sim	Sim	Sim
Análise de emissões e impacto ambiental	Sim	Sim	Não
Simulação de comportamento de pedestres	Sim	Sim	Não
Importação de dados geoespaciais	Sim	Sim	Sim
Visualização 3D e criação de cenários	Sim	Sim	Sim
Ferramentas de otimização e análise de resultados	Sim	Sim	Não
Suporte a estudos de segurança viária	Sim	Sim	Sim
Geração de relatórios e apresentações	Sim	Sim	Sim
Análise de demanda e alocação de viagens	Não	Sim	Sim
Simulação de veículos autônomos	Não	Sim	Não
Integração com outros <i>softwares</i>	Não	Não	Sim
Facilidade para desenvolvimento do projeto	Sim	Sim	Sim



DOI: [10.29327/1430212.49-79](https://doi.org/10.29327/1430212.49-79)

ANÁLISE COMPARATIVA DE SOFTWARES DE MODELAGEM
DE TRÁFEGO APLICADO EM AMBIENTE URBANO

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao término da análise comparativa, cada software oferece suas particularidades, com pontos positivos e pontos de evolução que foram avaliados. O cenário mais favorável seria onde os softwares pudessem ter uma integração dos dados e permitir interface com as plataformas BIM, desta forma facilitando comparações como a realizada. O PTV Vissim e o Aimsun não oferecem interface com o BIM. A exceção é o software InfraWorks, que já oferece esta interface.

Considerou-se que o resultado deste estudo é um framework de trabalho que pode ser replicado para outras simulações de forma sistemática. Desta forma, criando uma ontologia de como comparar resultados de simulações de tráfego a fim de identificar os cenários mais eficientes para a realidade de cada cidade, não se limitando à ótica de apenas um software. Pensando nas Cidades Inteligentes, essa integração de dados supracitada levaria as gestões públicas a longas distâncias em termos de facilitação das iniciativas “smart”, que precisam de comunicação entre si para trazer eficiência ao tráfego e mobilidade.

Ademais, o PTV Vissim é o software mais completo frente aos demais, apresentando todas as funcionalidades analisadas. O Aimsun tem qualidade semelhante ao PTV Vissim, porém apresenta limitações em determinadas análises. O principal ponto positivo do software InfraWorks é sua capacidade de relacionamento com o BIM (ausente nos demais).

6 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig).

7 REFERÊNCIAS

- Aimsun (2024). **Digital mobility solutions**. Disponível em: <https://www.aimsun.com/>. Acesso em: 18 abril 2024.
- ANTONIOU, P., CHARALAMBOS, S., VASSILIOU, V. (2014). **Congestion Control Protocols in Wireless Sensor Networks: a survey**. Department of Computer Science, University of Cyprus, Cyprus
- AUTODESK, **Infraworks: modelo conceitos de projeto de infraestrutura e construção com o contexto do mundo real**. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/products/infraworks/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>. Acesso em 15 jun. 2023.
- AVRAMOVIC, S., JOHNSON, E. (2017). **Evaluation of Autodesk Infraworks 360 and PTV Vissim**. 2017. 85f. Dissertação de Mestrado (Programa de Mestrado em Infraestrutura e Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Tecnologia de Chalmers, Gothenburg,
- BARCELÓ, J. (2012). **Fundamentals of Traffic Simulation. International Series in Operations Research & Management Science, New York, Ed. Springer**.
- DELANEZE, M., RIEDEL, P. S., MARQUES, M. L., FERREIRA, M. V. (2014). **Modelagem dinâmica espacial para o monitoramento do crescimento urbano no entorno do Duto Orbel**. Revista Brasileira de Cartografia, São Paulo, n. 66/3, pp. 473-484.
- HALMLMANN, H. V. (2011). **Comparação entre Softwares Simuladores de Trânsito**. 2011. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciência da Computação) – Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.



KAWAMOTO, Eiji. (2010) **Análise de Sistemas de Transportes**. São Carlos: EdUSP.

LOPEZ, P. A. et al. (2018). **Microscopic Traffic Simulation using SUMO**, 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, HI, USA, pp. 2575-2582.

PORTUGAL, L.S. (2005). **Uso de Micro-simulador na Análise de Desempenho Viário em Redes com Pólos Geradores de Viagens**. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PTV Group (2024). **PTV VISSIM: Multimodal Traffic Simulation Software**. Disponível em: <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim>. Acesso em: 18 abril 2024.

RONALDO, A., ISMAIL, M. (2012). **Comparison of the Two Micro-Simulation Software Aimsun and SUMO for Highway Traffic Modelling**. Linköping University. Suécia.

SENNA, L. A. dos S. (2014). **Economia e Planejamento dos Transportes**. [S.l.]: Elsevier Brasil.

TETTAMANTI, T., VARGA, I. (2012). **Development of road traffic control by using integrated VISSIM-MATLAB simulation environment**. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 56(1), p.43. doi:<https://doi.org/10.3311/pp.ci.2012-1.05>.



ESTUDO DE CASO ANTEPROJETO X CONTRATAÇÃO INTEGRADA – INTERSEÇÃO EM DESNÍVEL NA RODOVIA BR-376/PR, CRUZAMENTO COM PR-317, EM MARINGÁ/PR

*Aline Viana Pereira¹; Victor Eduardo Antunes²; Darlan Paiva Santana³
& Carlos Guilherme Pittarello dos Santos⁴*

RESUMO

O artigo analisa as implicações da nova Lei de Licitações (Lei nº 14.133/2021) nas modalidades de contratação de obras públicas, focando na contratação de anteprojeto e sua integração em contratos de execução. Utilizando o caso específico do desenvolvimento do "Trevo Catuaí" uma interseção em desnível na rodovia BR-376/PR, cruzamento com PR-317, em Maringá/PR, o estudo compara a contratação inicial do anteprojeto com a contratação integrada subsequente. Observou-se que, antes da nova legislação, a contratação de anteprojeto seguia padrões tradicionais de licitação, enquanto a nova lei permite sua contratação de forma isolada. Essa mudança oferece maior flexibilidade e adaptabilidade aos projetos. A análise do caso evidenciou que a contratação integrada promove uma abordagem mais eficiente e colaborativa, minimizando divergências entre o anteprojeto e o projeto executivo. Apesar do prazo considerável de aproximadamente 4 anos para a conclusão da obra, desde o início das tratativas até a implantação, o processo foi conduzido de forma eficiente, evitando atrasos significativos. Destaca-se que, nas condições específicas deste estudo, em que o anteprojeto foi concedido por uma empresa terceirizada, a contratação integrada se mostrou viável e eficaz. O artigo ainda traz um comparativo em relação ao prazo destas modalidades de contratação em relação a contratação de Projeto Executivo e Obra separadamente. Em resumo, o estudo destaca a importância de adaptar as modalidades de contratação às necessidades específicas de cada projeto, visando à otimização de recursos e à entrega de infraestrutura de qualidade à comunidade.

PALAVRAS-CHAVE: (Anteprojeto; Contratação Integrada; Infraestrutura Viária; Projeto Executivo).

ABSTRACT

The article analyzes the implications of the new Bidding Law (Law No. 14,133/2021) on the modalities of contracting public works, focusing on the contracting of preliminary projects and their integration into execution contracts. Using the specific case of the development of "Trevo Catuaí", an uneven intersection on the BR-376/PR highway, crossing with PR-317, in Maringá/PR, the study compares the initial contracting of the preliminary project with the subsequent integrated contracting. It was observed that, before the new legislation, preliminary project contracting followed traditional bidding patterns, while the new law allows for contracting in isolation. This change offers greater flexibility and adaptability to projects. The case analysis showed that integrated contracting promotes a more efficient and collaborative approach, minimizing divergences between the preliminary project and the executive project. Despite the considerable timeframe of approximately 4 years to complete the work, from the beginning of negotiations to implementation, the process was conducted efficiently, avoiding significant delays. It is noteworthy that, under the specific conditions of this study, in which the preliminary project was awarded by an outsourced company, integrated contracting proved to be viable and effective. The article also provides a comparison regarding the term of these contracting modalities in relation to contracting the Executive Project and Work separately. In summary, the study highlights the importance of adapting contracting modalities to the specific needs of each project, aiming to optimize resources and deliver quality infrastructure to the community.

KEY WORDS: (Preliminary project; Integrated Contracting; Road Infrastructure; Efficiency).

1 Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER/PR), aline.viana@der.pr.gov.br; victorea@der.pr.gov.br; dpsantana@der.pr.gov.br; carlosgps@der.pr.gov.br.



INTRODUÇÃO

No contexto das recentes mudanças na legislação de licitações no Brasil, surge a necessidade de compreender como essas alterações impactam as modalidades de contratação de obras públicas, especialmente no que diz respeito à contratação de anteprojeto e à sua subsequente integração em contratos de execução. Este estudo examina essa transição com foco no "Trevo Catuaí", uma interseção em desnível na rodovia BR-376/PR, cruzamento com PR-317, em Maringá/PR. Ao comparar a contratação inicial do anteprojeto com o andamento da contratação integrada para o mesmo projeto, busca-se avaliar como as novas diretrizes influenciam a eficiência, coesão e resultados. O objetivo é fornecer percepções relevantes para o aprimoramento dos processos de planejamento e execução de obras públicas, visando à otimização de recursos e à entrega de infraestrutura de qualidade à comunidade.

TIPOS DE CONTRATAÇÕES DE ACORDO COM A NOVA LEI

A contratação de anteprojeto no Brasil ocorre em fases preliminares do processo de licitação e planejamento de obras públicas, antes da elaboração do projeto básico e executivo. Antes da entrada em vigor da nova Lei de Licitações (Lei nº 14.133/2021), a contratação de anteprojeto era realizada através de modalidades tradicionais como concorrência ou tomada de preços, ou ainda em modalidades específicas para serviços técnicos especializados. O objetivo era obter um estudo preliminar que definisse as diretrizes básicas da obra ou serviço a ser contratado.

Com a nova Lei de Licitações, a contratação de anteprojeto pode ocorrer de forma isolada, sem a necessidade de contratar o projeto básico e executivo conjuntamente, permitindo maior flexibilidade na contratação de serviços técnicos especializados para a elaboração de estudos preliminares e anteprojetos. Após a contratação do anteprojeto, a contratação integrada pode ser realizada, onde a contratada é responsável pelo projeto básico, projeto executivo e execução da obra, conforme o inciso XXXII do art. 6º da lei.

Contratação de Anteprojeto

Na fase de contratação de anteprojeto, pede-se de acordo com o Termo de Referência que a contratada realize estudos preliminares, levantamentos topográficos, análises de tráfego, estudos geotécnicos e ambientais para definir as diretrizes básicas do projeto.

Essa etapa permite uma compreensão mais profunda das necessidades locais, das condições geográficas, do impacto ambiental e dos requisitos de segurança, resultando em um anteprojeto robusto que serve como base para o desenvolvimento subsequente do projeto. Observa-se algumas mudanças na legislação com a nova lei de licitação 14.133/2021, como:

Antiga Legislação: Antes da nova lei, a contratação de anteprojeto podia ocorrer através de modalidades tradicionais de licitação, como concorrência ou tomada de preços, mas não havia uma regulamentação clara sobre a possibilidade de contratação isolada do anteprojeto sem a necessidade de vinculação imediata com o projeto executivo.

Nova Legislação: Com a Lei nº 14.133/2021, a contratação de anteprojeto pode ocorrer de forma isolada, permitindo maior flexibilidade e especialização na fase preliminar dos estudos. O anteprojeto pode ser licitado separadamente, permitindo que o projeto executivo e a execução sejam contratados em momentos distintos, conforme a necessidade e conveniência do órgão contratante.

A contratação de anteprojeto é uma prática que faz parte do processo de planejamento e contratação de obras públicas, visando estabelecer as bases e diretrizes iniciais do projeto antes da elaboração do projeto executivo e da execução da obra. O início dessa contratação pode variar de acordo com as políticas e normas específicas de cada país ou jurisdição, no Brasil seguimos a nova Lei de Licitações, publicada em 2021 - Lei nº 14.133/2021.



[DOI: 10.29327/1430212.49-77](https://doi.org/10.29327/1430212.49-77)

ESTUDO DE CASO ANTEPROJETO X CONTRATAÇÃO INTEGRADA –
INTERSEÇÃO EM DESNÍVEL NA RODOVIA BR-376/PR, CRUZAMENTO COM PR-317, EM MARINGÁ/PR

Na infraestrutura viária, o anteprojeto desempenha um papel crucial na definição das diretrizes básicas e no planejamento preliminar de rodovias, viadutos, pontes, túneis e outras estruturas relacionadas ao tráfego terrestre.

Desta forma, permite aos engenheiros e planejadores compreenderem as necessidades específicas da região em questão devido os estudos iniciais, considerando fatores como volume de tráfego, condições geográficas, impactos ambientais e requisitos de segurança. Com base nessas informações, são definidos os parâmetros gerais do projeto, como a localização da via, o número de faixas de tráfego, as interseções, os acessos e as obras complementares necessárias.

Na contratação do anteprojeto também pode incluir a definição preliminar de características como largura da pista, curvas, declives, sinalização, drenagem, pavimentação e elementos de segurança, como guardrails e barreiras de proteção.

Uma vez concluído o anteprojeto, ele serve como base para a elaboração do projeto básico e executivo ou ainda a contratação integrada, que detalhará de forma mais precisa e técnica todos os elementos da obra, incluindo cálculos estruturais, especificações de materiais e métodos construtivos. Portanto, o anteprojeto na infraestrutura viária é essencial para orientar o desenvolvimento subsequente do projeto, garantindo que as soluções propostas atendam efetivamente às necessidades da comunidade, respeitando os requisitos técnicos, ambientais e de segurança.

Contratação Integrada

Após a conclusão do anteprojeto, a contratação integrada realiza-se o projeto executivo e execução da obra, utilizando o anteprojeto como referência. Nesse modelo, o contratado é responsável pelo desenvolvimento do projeto básico, executivo e pela execução da obra, proporcionando maior integração entre planejamento e execução, o que pode reduzir riscos de atrasos, custos adicionais e problemas de coordenação.

O anteprojeto fornece uma base sólida e bem fundamentada, enquanto a contratação integrada permite uma execução mais eficiente e integrada da obra.

Essa abordagem pode resultar em economia de tempo e recursos, redução de conflitos e melhorias na qualidade do projeto final.

Em resumo, a junção inicialmente de uma contratação de anteprojeto seguida por uma contratação integrada do mesmo local pode oferecer uma estratégia eficaz para o desenvolvimento de projetos de infraestrutura viária, combinando uma base sólida de planejamento com uma execução integrada e eficiente da obra.

A junção inicial de uma contratação de anteprojeto seguida por uma contratação integrada do mesmo é a base desse estudo de caso relacionado a contratação do “Trevo Catuaí”, referente a contratação integrada de empresa para elaboração do Projeto Básico e Executivo e Execução das obras de interseção em desnível na rodovia BR-376/PR, cruzamento com PR-317 e acesso à Av. João Pereira, no segmento do km 170,7 ao km 172,9 no município de Maringá/PR, numa extensão de 2.174,00 m.

INOVAÇÃO NA MODALIDADE DE LICITAÇÃO

Antiga Legislação: A Lei nº 8.666/1993 previa modalidades de licitação mais tradicionais, como concorrência, tomada de preços, convite, concurso e leilão. Cada modalidade tinha suas características específicas e procedimentos definidos, o que às vezes limitava a flexibilidade dos processos de contratação.

Nova Legislação: A Lei nº 14.133/2021 introduz a possibilidade de utilização de novas modalidades, como o diálogo competitivo e o procedimento de manifestação de interesse. Essas



modalidades permitem maior flexibilidade e inovação, especialmente em contratos que envolvem alta complexidade técnica ou necessidade de soluções inéditas.

Responsabilidade e Garantias

Antiga Legislação: A responsabilidade do contratado e as garantias exigidas estavam previstas, mas não havia uma ênfase na responsabilidade do contratado pelo projeto básico e executivo em uma única modalidade de contratação.

Nova Legislação: A contratação integrada, como definida pela nova lei, estabelece claramente que o contratado é responsável por todas as fases do projeto, desde o projeto básico até a execução final. Isso inclui a responsabilidade por qualquer erro ou omissão nos projetos desenvolvidos e nas obras executadas, o que pode melhorar a qualidade e a coerência dos projetos.

Sustentabilidade e Inovação

Antiga Legislação: A Lei nº 8.666/1993 não enfatizava tanto os aspectos de sustentabilidade e inovação nas contratações públicas.

Nova Legislação: A Lei nº 14.133/2021 incorpora diretrizes para contratações sustentáveis e incentiva a inovação, buscando não apenas a eficiência econômica, mas também a sustentabilidade ambiental e a responsabilidade social nas contratações públicas.

VANTAGEM PARA O ÓRGÃO PÚBLICO NA CONTRATAÇÃO INTEGRADA: IMPOSSIBILIDADE DE ADITIVAR VALOR

A contratação integrada, conforme definida pela nova Lei de Licitações (Lei nº 14.133/2021), apresenta diversas vantagens para os órgãos públicos, sendo uma das mais significativas a impossibilidade de aditar valor aos contratos. Essa característica traz benefícios importantes que se refletem na gestão financeira, na previsibilidade orçamentária e na qualidade dos projetos executados. A seguir, destacam-se algumas das principais vantagens dessa regra:

Previsibilidade Orçamentária

Na contratação integrada, o valor do contrato é fixado desde o início, abrangendo todas as fases do projeto, desde a elaboração do projeto básico até a entrega final da obra. Isso garante uma previsibilidade orçamentária significativa, permitindo que o órgão público planeje e aloque recursos de forma mais precisa e eficiente. A ausência de aditivos financeiros reduz o risco de estouro de orçamento, proporcionando uma maior segurança fiscal para os gestores públicos.

Redução de Riscos Financeiros

A impossibilidade de aditar valor no contrato integrado transfere a responsabilidade financeira das incertezas e dos imprevistos para o contratado. Isso implica que a empresa contratada deve gerir todos os riscos associados ao projeto dentro do valor previamente acordado. Essa transferência de risco incentiva as empresas a realizarem uma análise mais cuidadosa e detalhada dos projetos durante a fase de licitação, resultando em propostas mais realistas e bem fundamentadas.

Incentivo à Eficiência e Inovação

Ao saber que não poderá contar com aditivos financeiros, a empresa contratada tem um forte incentivo para adotar práticas eficientes e inovadoras na execução do projeto. A necessidade de cumprir o contrato dentro do valor acordado leva as empresas a buscarem soluções mais econômicas e criativas, otimizando recursos e processos. Isso pode resultar em obras de maior qualidade, entregues no prazo e com menor custo.

Melhoria na Qualidade do Planejamento

A contratação integrada exige que o projeto básico e executivo sejam bem detalhados e precisos desde o início. A impossibilidade de aditar valor faz com que tanto o órgão público quanto a empresa contratada dediquem mais tempo e esforço na fase de planejamento, garantindo que todos



DOI: [10.29327/1430212.49-77](https://doi.org/10.29327/1430212.49-77)

ESTUDO DE CASO ANTEPROJETO X CONTRATAÇÃO INTEGRADA –
INTERSEÇÃO EM DESNÍVEL NA RODOVIA BR-376/PR, CRUZAMENTO COM PR-317, EM MARINGÁ/PR

os aspectos e contingências do projeto sejam cuidadosamente considerados. Esse planejamento rigoroso diminui a probabilidade de problemas durante a execução da obra.

Transparência e Combate à Corrupção

A fixação de um valor único para todo o projeto aumenta a transparência e dificulta práticas corruptas, como superfaturamento e fraudes associadas a aditivos contratuais. A impossibilidade de aditar valor elimina uma das principais fontes de corrupção em obras públicas, promovendo uma gestão mais ética e transparente dos recursos públicos.

Cumprimento de Prazos

Sem a possibilidade de aditivos financeiros, a empresa contratada é incentivada a cumprir rigorosamente os prazos estabelecidos. Atrasos na execução do projeto podem resultar em prejuízos para a empresa, aumentando a importância de um cronograma bem definido e seguido à risca. Isso beneficia o órgão público e a comunidade, que podem contar com a entrega da obra no prazo previsto.

METODOLOGIA

Este estudo de caso tem como objetivo realizar comparações entre o anteprojeto do "Trevo Catuaí", sendo a interseção em desnível na rodovia BR-376/PR, cruzamento com PR-317 e acesso à Av. João Pereira, no segmento do km 170,7 ao km 172,9 no município de Maringá/PR, numa extensão de 2.174,00 m, e o andamento da contratação integrada para a mesma localidade, que atualmente está em curso da fase final de aprovação do Projeto Executivo e aprovação do inventário ambiental. O "Trevo Catuaí" é uma importante obra viária que visa melhorar a mobilidade e a segurança no tráfego rodoviário na região de Maringá, no estado do Paraná, no qual executará uma interseção em desnível do entroncamento da PR-317 com a Av. Colombo, perímetro urbano de alto fluxo, sendo de suma importância a realização da obra. O anteprojeto inicialmente elaborado estabeleceu as diretrizes básicas e os requisitos preliminares para a reestruturação e modernização desse trevo, com os levantamentos iniciais e entregas como levantamento topográficos, geológico, projeto geométrico, projeto de passarelas, sinalização, drenagem, entre outros.

Com a contratação integrada, que representa uma abordagem inovadora no desenvolvimento dessa obra, buscando garantir uma maior eficiência e integração entre o planejamento e a execução da obra, consolidando o anteprojeto como referência inicial e permitindo uma colaboração mais estreita entre os diferentes agentes envolvidos no processo.

Ao comparar o anteprojeto com o andamento da contratação integrada, este estudo visa avaliar os seguintes aspectos:

- Quais as principais divergências encontradas na entrega do Anteprojeto em relação ao Projeto Executivo;
- Realizar uma análise crítica do desenvolvimento do Anteprojeto em relação ao desenvolvimento da Contratação Integrada, na compatibilidade e eficiência dos produtos entregues. Por meio dessa análise comparativa, busca-se identificar as vantagens e desafios de cada abordagem, bem como extrair lições que possam orientar futuros projetos de infraestrutura viária. O objetivo final é contribuir para o aprimoramento dos processos de planejamento e execução de obras públicas, visando sempre a melhoria da qualidade de vida e o bem-estar da população;
- Qual o prazo desde o início do Anteprojeto até a conclusão da obra;
- Realizar uma análise comparativa entre o prazo de Anteprojeto juntamente com a Contratação Integrada e o Prazo da Contratação do Projeto Executivo juntamente com a Execução da Obra;



RESULTADOS

O Anteprojeto teve seu início em setembro de 2021 e o orçamento da obra foi entregue em março de 2022, a licitação para contratação no modelo Contratação Integrada e ocorreu no dia 03 de julho 2023, com a Ordem de Serviço no dia 09 de outubro de 2023, totalizando 720 dias de contratação, com a finalização prevista para 28 de setembro de 2025. Atualmente o contrato está na finalização do Projeto Executivo, aguardando a Licença Ambiental para início da obra. Em relação ao comparativo dos produtos entregues, observamos:

Estudo Topográfico

A projetista da contratação integrada realizou um novo estudo topográfico no qual foi observado uma divergência em relação ao marco zero levantado no anteprojeto. Com isto, faria com que a faixa de domínio estivesse deslocada cerca de 01 metros, essa intervenção afetaria a fase de Desapropriação. Após reunião com o órgão, foi constatado que o levantamento da projetista da Contratação Integrada estava de acordo com a alocação do marco zero e eixo da rodovia. Desta forma, ocorreram divergências dos pontos levantados no anteprojeto e no projeto executivo.



Figura 1. Estudo Topográfico (Anteprojeto “Trevo Catuaí”, 2021).



Figura 2. Estudo Topográfico (Contratação Integrada “Trevo Catuaí”, 2024).

Estudo Geotécnico

A projetista da Contratação Integrada realizou um novo estudo geotécnico de forma a garantir a segurança dos dados levantados. Foi observado diferença dos levantamentos realizados no anteprojeto e projeto executivo.

Projeto Geométrico

Para projeto executivo utilizado as larguras das vias, raios de curvas, aproveitando praticamente 100% do anteprojeto, algumas divergências como o posicionamento do marco zero.



DOI: [10.29327/1430212.49-77](https://doi.org/10.29327/1430212.49-77)

ESTUDO DE CASO ANTEPROJETO X CONTRATAÇÃO INTEGRADA –
INTERSEÇÃO EM DESNÍVEL NA RODOVIA BR-376/PR, CRUZAMENTO COM PR-317, EM MARINGÁ/PR

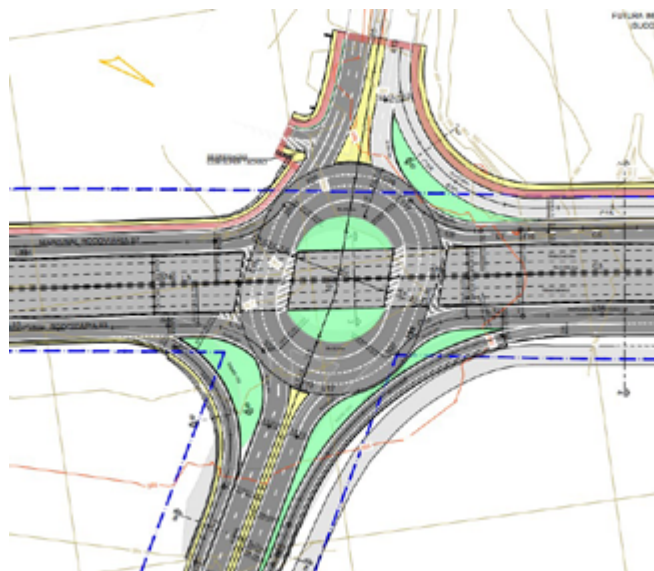


Figura 3. Projeto Geométrico (Anteprojeto “Trevo Catuai”, 2021).

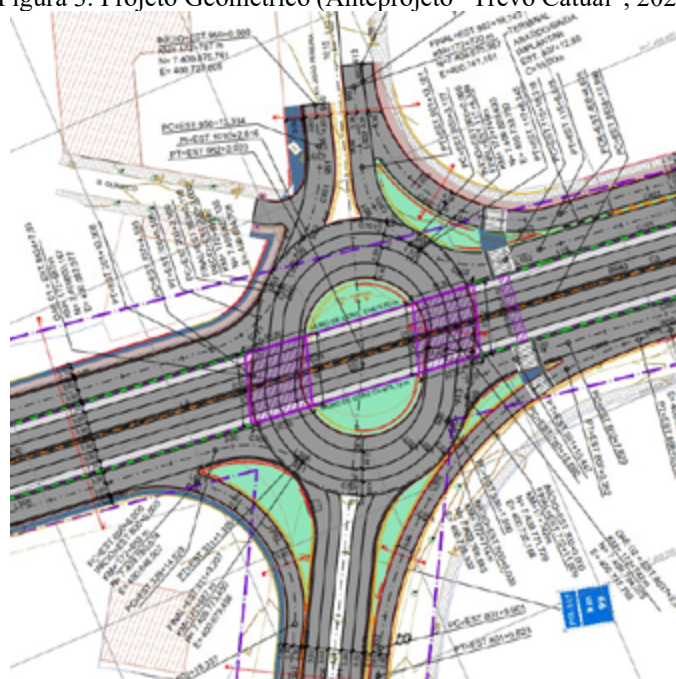


Figura 4. Projeto Geométrico (Contratação Integrada “Trevo Catuai”, 2024).

Projeto OAE

Não foi utilizada a estrutura do anteprojeto, no Projeto Executivo aprovado a OAE será moldada in loco o que se permite fazer a curva da rotatória no viaduto, o que não era possível com a estrutura do Anteprojeto.



Aline Viana Pereira, Victor Eduardo Antunes, Darlan Paiva Santana & Carlos Guilherme Pittarello dos Santos

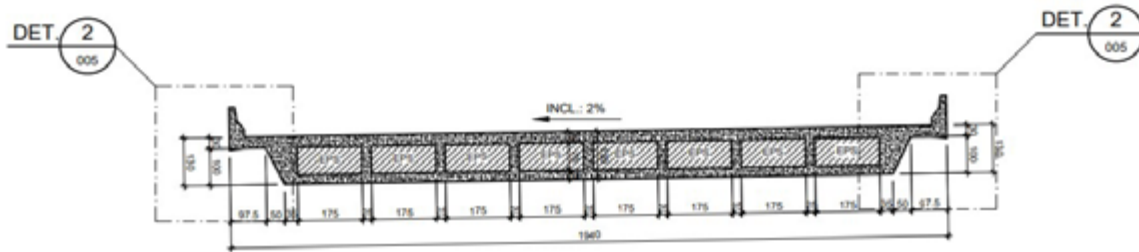


Figura 5. Projeto OAE (Anteprojeto “Trevo Catuaí”, 2021).

Figura

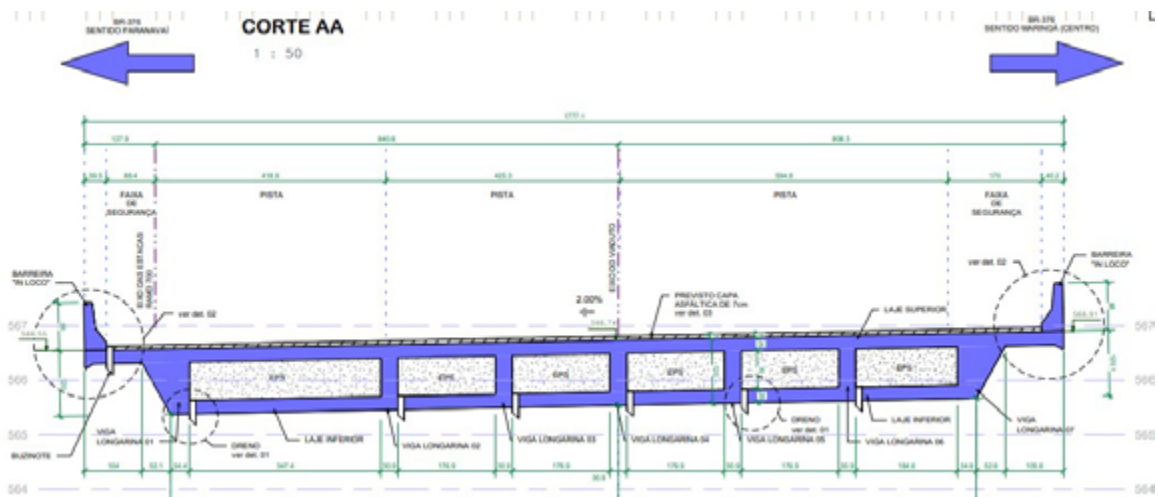


Figura 6. Projeto OAE (Contratação Integrada “Trevo Catuaí”, 2024).

Projeto De Sinalização

Utilizado parcialmente no Projeto Executivo, pois as placas foram diagramadas novas pela contratada, que estariam de forma mais clara e usual para o usuário.

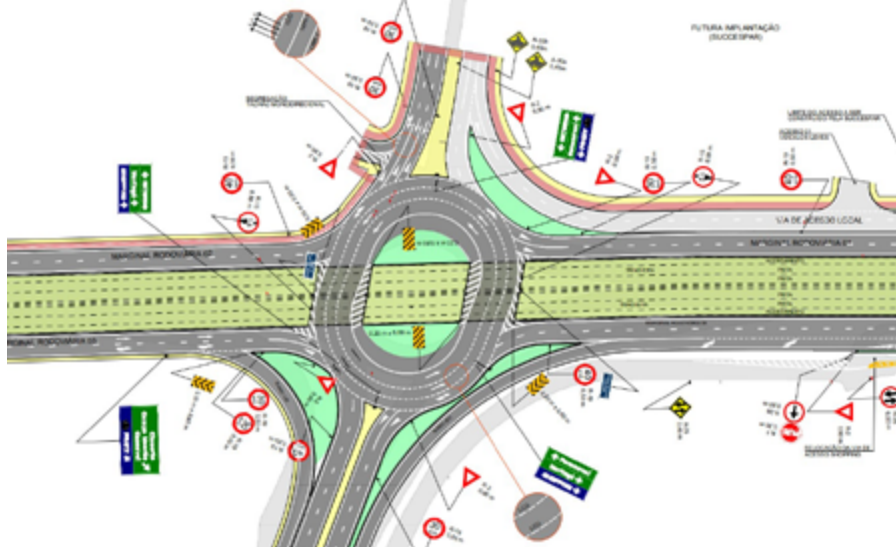


Figura 7. Projeto Sinalização (Anteprojeto “Trevo Catuaí”, 2021).

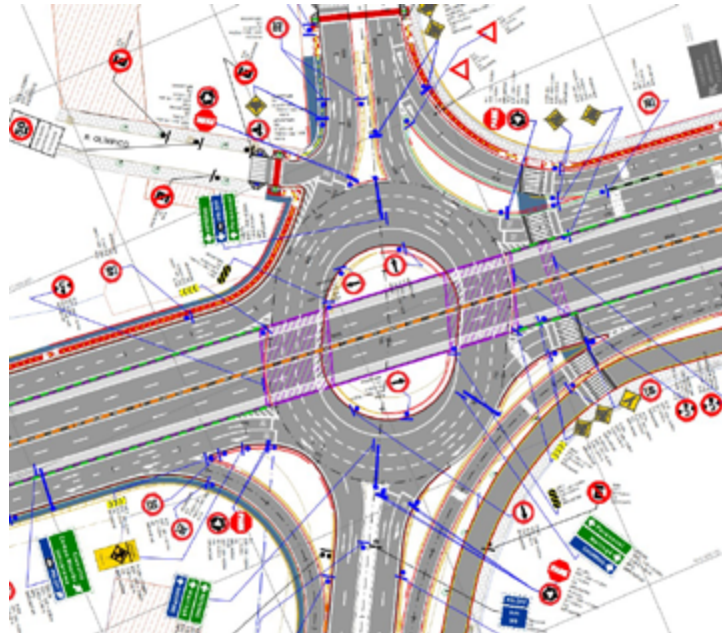
DOI: [10.29327/1430212.49-77](https://doi.org/10.29327/1430212.49-77)ESTUDO DE CASO ANTEPROJETO X CONTRATAÇÃO INTEGRADA –
INTERSEÇÃO EM DESNÍVEL NA RODOVIA BR-376/PR, CRUZAMENTO COM PR-317, EM MARINGÁ/PR

Figura 8. Projeto Sinalização (Contratação Integrada “Trevo Catuaí”, 2024).

Projeto De Pavimentação

Não foi possível utilizar a mesma estrutura do pavimento proposta no anteprojeto, pois não foi realizado a análise mecanicista anteriormente. Desta forma, de acordo com o método utilizado pela projetista da contratação integrada, a estrutura proposta estaria com a espessura menor do que a recomendada, por este motivo foi apresentado outra estrutura do pavimento.

A empresa da Contratação Integrada recalculou o número N, realizando uma nova contagem de tráfego por 7 dias durante 24 horas.

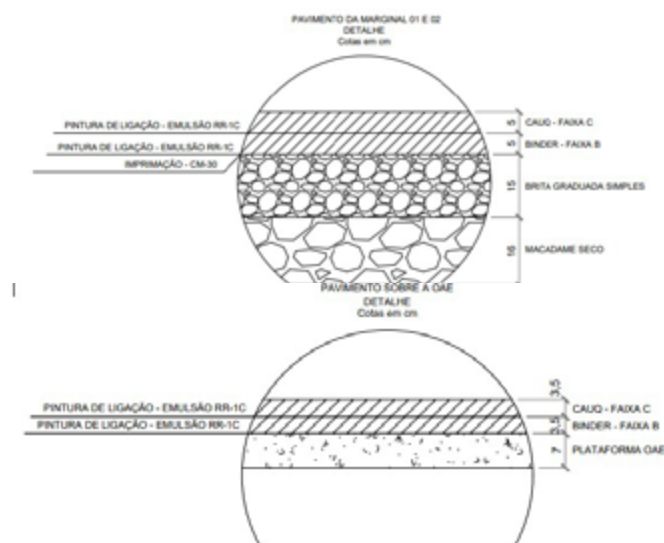


Figura 9. Projeto Pavimentação (Anteprojeto “Trevo Catuaí”, 2021).



Aline Viana Pereira, Victor Eduardo Antunes,
Darlan Paiva Santana & Carlos Guilherme Pittarello dos Santos

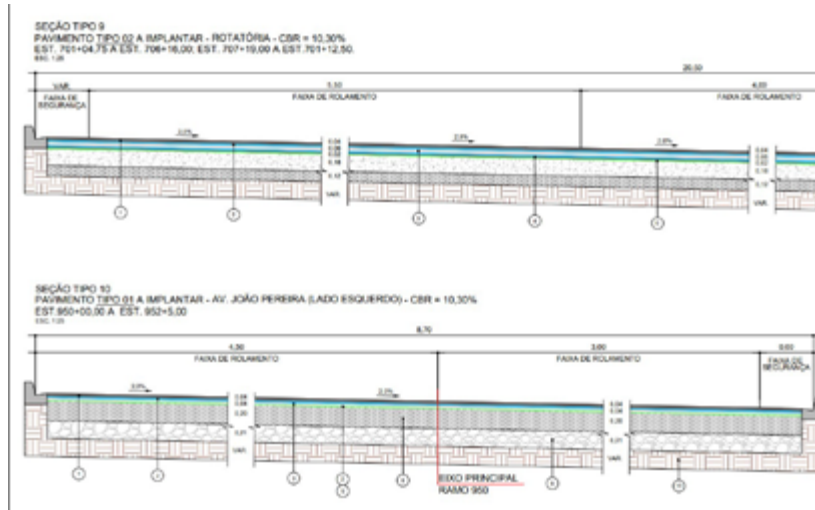


Figura 10. Projeto Pavimentação (Contratação Integrada “Trevo Catuaí”, 2024).

Projeto Passarelas

Inicialmente, as passarelas foram apresentadas no anteprojeto de acordo com as estruturas padrões do caderno do DNIT, de forma que não foram estudados anteriormente a implantação da passarela de acordo com a topografia do local.

A projetista da Contratação Integrada, após os levantamentos propôs uma nova passarela, alterando o local da passarela 01, pois no local previsto do anteprojeto teria interferência com ligações de energia da Copel e os gastos para realocações de postes de alta tensão não estavam previstos no escopo, e ainda, acarretaria o atraso da obra até realizar o remanejamento de postes de alta tensão.

Desta forma o DER/PR, em conjunto com o projetista e participação do município buscaram uma alternativa mais viável, chegando ao local atualmente determinado, de modo que obteve alteração na sua localização e concepção da estrutura da passarela, quando comparado ao anteprojeto.



Figura 11. Projeto Passarela (Anteprojeto “Trevo Catuaí”, 2021).

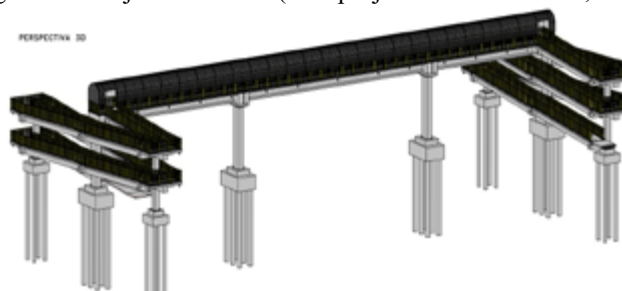


Figura 12. Projeto Passarela (Contratação Integrada “Trevo Catuaí”, 2024).

DOI: [10.29327/1430212.49-77](https://doi.org/10.29327/1430212.49-77)ESTUDO DE CASO ANTEPROJETO X CONTRATAÇÃO INTEGRADA –
INTERSEÇÃO EM DESNÍVEL NA RODOVIA BR-376/PR, CRUZAMENTO COM PR-317, EM MARINGÁ/PR

Projeto De Contenções

No Projeto Executivo foi previsto uma contenção a mais que não estava prevista no anteprojeto, localizada na PR-317, nas coordenadas -23.419044, -51.969378, (próxima a Concrebrás), após realizado o levantamento.

Projeto De Drenagem

O anteprojeto e projeto executivo tiveram pontos convergentes principalmente nos desagues proposto, de modo que o anteprojeto foi aproveitado em sua totalidade.

Análise Comparativa

Em relação a contratação de Projeto Executivo e na sequência contratação de Execução de Obra, para a realização da análise comparativa em relação ao prazo, utilizou os contratos CO062/2019DT (Projeto Executivo) e CO007/2021DT (Execução da Obra), que tinham o mesmo objeto sendo “*Execução de Duplicação da Rodovia PR-323, implantação de duas interseções em desnível, implantação de vias marginais, Umuarama/PR.* Nesta contratação o período para elaboração do projeto executivo foi de 180 dias e o período da execução da obra foi de 808 dias, considerando ainda os tramites de licitação, o prazo do início do Projeto até a conclusão da obra foi de 3 anos e 3 meses.

Realizando-se uma análise descontando o período de trâmites licitatórios e de decisões dos dois contratos, obtêm-se:

DATAS DE ESTUDOS			
CO062/2019DT (Projeto) e CO007/2021DT (Obra)			
Projeto Executivo	17/02/2020	15/08/2020	180
Tempo de Licitação	15/08/2020	12/03/2021	209
Execução da Obra	12/03/2021	29/05/2023	808
Descontando o período de Tramitação/ Decisão			988

Tabela 01. Contratos Projeto Executivo e Obra (Autora, 2024).

CO096/2023DT			
Contratação Integrada			
Projeto Executivo	01/09/2021	01/03/2022	181
Tempo de Licitação	01/03/2022	09/10/2023	587
Execução da Obra	09/10/2023	28/09/2025	720
Descontando o período de Tramitação/ Decisão			901

Tabela 02. Contratos Anteprojeto e Contratação Integrada (Autora, 2024).

Desta forma, pode-se observar que o prazo para o projeto e execução nas duas modalidades de contratos foi bastante semelhante: 3 anos e 8 meses para o Projeto Básico, Executivo e Execução de Obra, e 3 anos e 5 meses para o Anteprojeto e Contratação Integrada.

No que diz respeito aos aditivos de valor, a modalidade de Contratação Integrada se destaca positivamente. De acordo com a Lei 14.133/2021, essa modalidade não permite aditivos de valor (em ressalva o aditivo de valor pode ocorrer em casos extraordinários), fixando os valores desde o início. Isso garante a previsibilidade orçamentária, como observado no contrato CO096/2023DT. Em contraste, o contrato CO007/2021DT teve um aditivo de valor devido a serviços adicionais em 20/07/2022, próximo ao final do contrato, necessitando uma nova alocação de recursos públicos



que não estava prevista no início da obra. Assim, a Contratação Integrada proporciona maior segurança aos fiscais e permite um planejamento de recursos com maior precisão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas informações e comparações apresentadas, podemos concluir que o processo de contratação integrada demonstrou eficiência e coerência em diversos aspectos, apesar do prazo de aproximadamente 4 anos para a finalização da obra desde o início das tratativas até a conclusão da implantação.

Ao analisar todo o processo, desde os levantamentos iniciais até a execução da obra, incluindo os estágios de Anteprojeto, Projeto Executivo e todos os trâmites legais, observamos que a contratação integrada proporcionou uma abordagem que se mostrou adequada às necessidades do projeto. Apesar do prazo ser considerável, o processo foi conduzido de forma a minimizar divergências entre o Anteprojeto e o Projeto Executivo, evitando atrasos significativos no andamento do contrato.

É importante destacar que, nas condições específicas deste estudo de caso, em que o Anteprojeto foi concedido por uma empresa terceirizada ao invés de ser obtido por licitação do DER/PR, a contratação integrada se mostrou uma escolha viável e eficaz. Essa abordagem proporcionou uma maior integração entre as diferentes fases do projeto, possibilitando uma execução mais eficiente e colaborativa.

Além disso, a modalidade de Contratação Integrada se destaca por não permitir aditivos de valor, conforme estabelecido pela Lei 14.133/2021. Isso garante a previsibilidade orçamentária, evitando a necessidade de novas alocações de recursos públicos não previstas desde o início. Esse aspecto proporciona maior segurança aos fiscais e permite um planejamento de recursos com maior precisão, como evidenciado pela comparação entre os contratos analisados.

Em relação à análise comparativa com os contratos de Projeto Executivo e posterior contratação da execução da obra, os resultados não mostraram grandes divergências. Isso impede concluir que as modalidades de Anteprojeto e Contratação Integrada são significativamente mais ágeis do que a contratação do Projeto Executivo e Execução das Obras separadamente.

Portanto, diante das circunstâncias apresentadas, é crucial avaliar cada caso individualmente e selecionar a abordagem de contratação mais adequada às características e necessidades específicas de cada projeto de infraestrutura viária. A análise crítica entre o Anteprojeto e a contratação integrada reflete positivamente, evidenciando que, apesar do prazo, considerando todos os trâmites até a licitação, o processo foi conduzido de forma eficiente e sem causar atrasos no andamento do contrato.

REFERÊNCIAS

Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021. Institui o novo marco legal das licitações e contratações públicas no Brasil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1º abr. 2021. Seção 1, p. 1. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/14133.htm]. Acesso em: [07/06/2024].

Contrato CO062/2019DT [22/11/2019]. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR), Superintendência Regional Noroeste.

Contrato CO007/2021DT [01/03/2021]. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR), Superintendência Regional Noroeste.

Contrato CO096/2023DT [04/09/2023]. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR), Superintendência Regional Noroeste.



PROPOSTAS DE MELHORIAS PARA REMUNERAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE TRÁFEGO EM OBRAS RODOVIÁRIAS

Pedro Igor de Araújo Rêgo¹; Sandra Patricia Echeverria Fernandez¹; Renan Abreu de Moura² & Caio Saravy Cardoso²

RESUMO

Este artigo examina a metodologia do Fator de Interferência de Tráfego (FIT) do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), propondo melhorias e soluções para questões sobre os parâmetros utilizados, como os percentuais e limites adotados, a consideração da quantidade de faixas de rolamento na definição do Volume Médio Diário (VMD), entre outros aspectos. O estudo também utiliza dados do software VISSIM para simulação de tráfego, destacando a relevância da criação de modelos de simulação para representar diferentes situações de projeto, utilizando uma abordagem de simulação microscópica para entender o comportamento do tráfego em rodovias pavimentadas a partir de diferentes volumes de tráfego e interferências de serviços executados ao longo de trechos rodoviários. A influência urbana é analisada por meio do sistema de informação geográfica (GIS), sendo o software QGIS utilizado para o gerenciamento de dados geoespaciais. Com base nisso, os resultados destacam a identificação de três tipos de atrasos, que ao serem incluídos ao FIT ampliam sua fundamentação teórica. Propõe-se uma atualização na metodologia com a inclusão de valores específicos e uma nova estrutura das Composições de Custos Unitários (CCUs) do SICRO. Conclui-se que, embora a metodologia antiga não seja falha, cabe a inclusão de parâmetros mais bem fundamentados. Com os parâmetros propostos, espera-se uma remuneração mais justa e precisa da interferência de tráfego em obras rodoviárias, melhorando a avaliação dos custos associados a esse aspecto crucial da construção de rodovias.

PALAVRAS-CHAVE: interferência de tráfego rodoviário; Simulação de tráfego; avaliação de custos; SICRO (Sistema de Custos Referenciais de Obras).

ABSTRACT

This article examines the methodology of the Traffic Interference Factor (FIT) within the Reference Cost System for Construction Works (SICRO), proposing improvements and solutions to issues regarding the parameters used, such as the adopted percentages and limits, the consideration of the number of lanes in defining the Average Daily Volume (VMD), among other aspects. The study also utilizes data from the VISSIM software for traffic simulation, highlighting the relevance of creating simulation models to represent different project situations, using a microscopic simulation approach to understand traffic behavior on paved highways based on different traffic volumes and the interferences of services performed along highway sections. Urban influence is analyzed through the Geographic Information System (GIS), with the QGIS software being used for geospatial data management. Based on this, the results highlight the identification of three types of delays, which, when included in the FIT, broaden its theoretical foundation. An update to the methodology is proposed with the inclusion of specific values and a new structure for SICRO's Unit Cost Compositions (CCUs). It is concluded that, although the old methodology is not flawed, the inclusion of better-founded parameters is warranted. With the proposed parameters, a fairer and more accurate remuneration of traffic interference in roadworks is expected, improving the evaluation of costs associated with this crucial aspect of highway construction.

KEY WORDS: Road traffic interference; Traffic simulation; cost evaluation; SICRO (Referential Cost System for Works).

¹ Fundação Getúlio Vargas - Instituto Brasileiro de Economia, pedro.rego@fgv.br; sandra.fernandez@fgv.br

² Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, renan.moura@dnit.gov.br; caio.cardoso@dnit.gov.br



INTRODUÇÃO

Atualmente, no Brasil, a remuneração da interferência de tráfego em obras rodoviárias é aplicada por meio da metodologia do Fator de Interferência de Tráfego – FIT do Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO. Desde a implantação do FIT em meados de 2017, o SICRO introduziu uma abordagem inovadora para a engenharia de custos brasileira. Especificamente, desenvolveu-se uma metodologia para que os orçamentos referenciais contemplassem o impacto financeiro das interferências de tráfego.

No entanto, além da busca constante por melhorias no sistema, alguns aspectos específicos podem ser refinados. Isso inclui os percentuais e limites adotados, a consideração da quantidade de faixas de rolamento na definição do Volume Médio Diário (VMD) e a definição de centros urbanos para a utilização de percentuais referentes à localização de serviços em trechos urbanos, entre outros pontos. Esses aspectos evidenciam a necessidade de aprimoramentos adicionais.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar propostas de melhorias para atualização da metodologia do FIT com parâmetros mais abrangentes. Para elaboração das propostas de melhorias, foram realizadas coletas de dados de campo, para reavaliação da forma com que o tráfego interfere na execução das obras; foi utilizado software para simulação de tráfego, em que foram simuladas diferentes condições de contorno para avaliação do impacto da velocidade de tráfego com diferentes valores de VMD por faixa; e foram analisados traçados das rodovias federais, para cálculo das velocidades de tráfego em áreas urbanas.

Ao propor melhorias tangíveis e fundamentadas, este trabalho contribui significativamente para o aprimoramento contínuo da engenharia de custos no Brasil, promovendo uma gestão mais eficiente e transparente dos recursos destinados às obras rodoviárias. Conseqüentemente, contribui para o desenvolvimento científico nacional, além de fomentar discussões sobre o tema.

A implementação dessas propostas de melhorias visa otimizar a precisão e a equidade na remuneração dos impactos do tráfego durante a construção de rodovias. Ao revisar e aprimorar a metodologia do FIT, espera-se alcançar uma maior precisão nos custos associados às interferências de tráfego, proporcionando uma compensação adequada e transparente para as obras rodoviárias, resultando em uma melhor alocação dos recursos públicos.

REFERENCIAL TEÓRICO

Bibliografia internacional acerca da interferência de tráfego em obras de engenharia

A revisão bibliográfica internacional se iniciou com um levantamento bibliométrico acerca da interferência de tráfego em obras de engenharia, por meio da plataforma Web of Science. Procedeu-se com definição das palavras-chaves (strings) de busca por termos em língua inglesa, a fim de ampliar os resultados obtidos. Cabe destacar que as palavras-chaves utilizam operadores booleanos “OR” (i.e., “ou”) e “AND” (i.e., “e”) a fim de estabelecer conexões entre as palavras desejadas (Piña, 2021). As palavras-chaves definidas foram:

- TITLE-ABS-KEY (highway AND construction AND productivity AND OR management OR factor of traffic OR accidents).

A partir dessa busca, até a presente data foram identificados um número restrito de publicações acerca do tema. De modo geral, o levantamento identificou 11 referências, conforme apresentado na tabela 1.



DOI: 10.29327/1430212.49-80

PROPOSTAS DE MELHORIAS PARA REMUNERAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE TRÁFEGO EM OBRAS RODOVIÁRIAS

Tabela 1. Levantamento bibliométrico

Artigo	Autor	Ano de publicação
<i>Impact of Construction Work Zone on Urban Traffic Environment</i>	Vyas e Varia	2023
<i>New Construction Cost Indices to Improve Highway Management</i>	Wong e Swei	2021
<i>Statistical analysis of construction productivity for highway pavement operations</i>	Choi e Ryu	2015
<i>Improving Predictability of Construction Project Outcomes through Intentional Management of Indirect Construction Costs</i>	Becker <i>et al.</i>	2014
<i>New classification of construction companies: overhead costs aspect</i>	Apanaviciene e Daugeliene	2011
<i>Quantifying the effects of interference for an alternative method of construction productivity estimation</i>	Choi	2011
<i>Measuring project level productivity on transportation projects</i>	Ellis e Lee	2006
<i>Interaction between population in a road section area and AADT. AADT forecasting using area population and traffic research data form neighbouring road sections</i>	Sliupas <i>et al.</i>	2006
<i>Integrated design/construction/operations analysis for fast-track urban freeway reconstruction</i>	Lee <i>et al.</i>	2005
<i>The effects of traffic flow rates at freeway work zones on asphalt pavement construction productivity</i>	Jiang	2003
<i>Construction productivity analysis for asphalt concrete pavement rehabilitation in urban corridors</i>	Lee <i>et al.</i>	2002

No que tange ao tráfego, Vyas e Varia (2023) discorrem que, em virtude do acelerado aumento populacional e da subsequente demanda por desenvolvimento, expansão e revitalização das vias, as intervenções nas seções rodoviárias ocorrem com frequência. Entretanto, tais ações também se configuram como áreas sensíveis para o fluxo de trânsito na malha viária.

De acordo com o estudo “Impact of Construction Work Zone on Urban Traffic Environment” (Ibidem), tais intervenções, principalmente em áreas urbanas, levam a muitos problemas, como a diminuição da capacidade viária, o aumento dos atrasos no tempo de deslocamento, o alongamento das filas de veículos, o incremento de cruzamentos forçados e ocorrências de acidentes rodoviários.

As zonas de construções são um dos principais fatores que contribuem para o congestionamento do tráfego, atrasos e acidentes sofridos pelos usuários das vias (Ibidem).

Outrossim, é importante ressaltar que os elementos mencionados anteriormente exercem uma influência significativa na dinâmica das equipes de trabalho e no transporte dos materiais essenciais para a execução dos serviços. Portanto, a eficiência do deslocamento desses materiais ao local da obra ou ao canteiro de construção desempenha um papel crucial, impactando diretamente na capacidade de produção diária (Bakri; Razak; Abd Shukor, 2021).

Nos Estados Unidos, a Federal Highway Administration – FHWA (2023) publicou que os acidentes na zona de construção ocorridos entre os anos de 2019 e 2021 estão super-representados nas áreas urbanas, dada a densidade populacional. Já nas rodovias, esse contexto representa quase 24% dos atrasos não recorrentes e 10% dos atrasos gerais.

No Brasil, a Empresa de Planejamento e Logística – EPL conduziu uma análise semelhante para o trecho rodoviário BR-101/SC, durante o período de 2014 a 2018, compreendendo os quilômetros 244+680 a 465+100 (EPL, 2019). Nesse contexto, foi observado que a maioria dos acidentes, especialmente em 2014, estava relacionada às obras em andamento. Além disso, constatou-se que os fatores que contribuíram para os acidentes desapareceram após a conclusão das obras.



De acordo com DNIT (2017), durante a execução de obras em rodovias já existentes, o volume de tráfego é um fator reconhecido de redução de produção dos serviços. As restrições ao tráfego se acentuam e se mostram particularmente relevantes quando se trata de obras mais próximas aos perímetros urbanos.

Os demais autores consultados, Wong e Swei (2021), Apanavičienė e Daugėlienė (2011), Becker et al. (2014), Choi e Ryu (2015), Choi (2011), Ellis e Lee (2006), Jiang (2003), Sliupas et al. (2006), Lee et al. (2005) e Lee et al. (2002) corroboram para esse entendimento de que as obras de engenharia sofrem os impactos decorrentes do tráfego, sejam eles de modo direto ou indireto, no entanto, não apresentam formas de quantificar o impacto financeiro para aplicação em orçamentos.

Conceitos viários

O Volume Médio Diário – VMD é a média do volume de veículos que circulam durante 24 horas em um trecho da via. Esse volume representa, de forma otimizada, a utilização ou o serviço prestado na via, sendo aplicado aos cálculos de índices de uso, como taxas de acidentes e receitas de postos de pedágio, assim como auxilia no planejamento de benefícios e investimentos (DNIT, 2006).

Os volumes médios dizem respeito a um período representativo, expressos em veículos por dia (i.e., vpd), que podem ser referentes aos seguintes intervalos de tempo (Ibidem):

- volume médio diário anual – VMDa: total de veículos que trafegam em um ano dividido por 365 dias;
- volume médio diário mensal – VMDm: total de veículos que trafegam em determinado mês dividido pelo número de dias do mês. Normalmente se faz acompanhado do nome do respectivo mês;
- volume médio diário semanal – VMDs: total de veículos trafegando em uma semana dividido por sete dias. Deve constar o nome do mês a que se refere;
- volume médio diário em um dia de semana – VMDd: total de veículos que trafegam em um dia de semana. É aconselhável que se refira ao dia da semana e ao mês.

As variações do conceito de VMD anual geralmente correspondem a amostras obtidas, para posterior ajuste e expansão para determinação do volume médio diário anual, que é o de maior importância (Ibidem). Os dados de VMD podem ser obtidos por contagens ininterruptas, ou contagens periódicas de cobertura nos quais são coletados dados durante horas, dias, uma semana ou até um mês. Após coleta, os dados são submetidos a correções por fatores de modo a refletir de forma mais precisa o tráfego sob análise, bem como a extrapolações de valores para os meses em que não foram feitas coletas (Riqueti, 2019).

Empiricamente, o tráfego de veículos varia de acordo com o dia da semana e o mês do ano, visto que as demandas pelas vias variam também, seja devido a questões econômicas, políticas e/ou sociais. Por exemplo, os meses de agosto e dezembro são considerados de alta temporada devido às férias escolares. Os finais de semana, por sua vez, possuem demanda diferente do resto da semana devido à mudança no fluxo de trabalhadores para as grandes cidades. A metodologia de coleta e tratamento de dados do VMD já considera tais variações, sendo usual a sua apresentação em orçamentos rodoviários.

Conceitos de custos

Conforme descrito no Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes - Volume 01 - Metodologias e Conceitos (DNIT, 2017), uma composição de custos trata-se de uma ferramenta que possibilita a determinação qualitativa e quantitativa dos recursos necessários para a realização de um determinado serviço de infraestrutura de transportes.



DOI: [10.29327/1430212.49-80](https://doi.org/10.29327/1430212.49-80)

PROPOSTAS DE MELHORIAS PARA REMUNERAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE TRÁFEGO EM OBRAS RODOVIÁRIAS

A soma das quantidades e dos consumos de diversos insumos (i.e., mão de obra, equipamentos, materiais, atividades auxiliares e transporte), ponderados pelos seus custos unitários e acrescidos da parcela de bonificação e despesas indiretas, culmina no preço final do serviço.

As composições de custos podem ser divididas em três tipos, a saber:

- composição de custos horária;
- composição de custos unitária;
- composição de custos mista horária/unitária.

A composição de custos horária discrimina os custos associados a uma hora de serviço a partir das informações necessárias para a realização de uma atividade em um período específico, normalmente uma hora. Esse tipo de composição, conforme DNIT (2017), é particularmente adequada para modelar serviços que seguem ciclos e envolvem a coordenação de patrulhas com diferentes equipamentos. Por essa razão, é a abordagem mais comum e recomendada para a elaboração de orçamentos em projetos de infraestrutura de transportes.

As composições de custos unitárias detalham o custo por unidade de serviço, incluindo elementos necessários para a execução de uma unidade específica dessa atividade. Em resumo, ela representa a relação entre os insumos e seus custos e consumos associados à produção de uma unidade de serviço determinada (DNIT, 2017).

Em relação à composição de custos mista horária/unitária, este procedimento combina elementos tanto do formato horário quanto do formato unitário.

No contexto do SICRO, mais precisamente, os componentes relativos a equipamentos e mão de obra são estabelecidos em termos horários, enquanto os componentes relacionados a materiais, serviços auxiliares e transporte são determinados com base no custo unitário (DNIT, 2017).

Na parcela horária do SICRO, os tempos de ciclo utilizados para calcular a produção horária são referentes a uma produção nominal, dessa forma, é necessária a utilização de um Fator de Eficiência (Fe), que consiste na relação entre o tempo de produção efetiva e o tempo de produção nominal.

A produção efetiva inclui tempos de tolerância inerentes à execução dos serviços. Em relação aos tempos de tolerância, Mattos (2019) traz como exemplos os deslocamentos da máquina de uma posição de trabalho para outra, pequenos reparos de campo, remoção de obstáculos, espera por outros equipamentos, más condições meteorológicas, pausa para lubrificação, descanso do operador, interrupções para receber instruções, entre outros aspectos. Por conseguinte, extrai-se o entendimento de que o equipamento não trabalha integralmente ao longo dos 60 minutos de uma hora.

De acordo com Barnes (1977), o tempo de tolerância remunera interrupções que podem ser classificadas conforme:

- tolerância pessoal: tempo para necessidades pessoais, variando entre 2,0% e 5,0% (10 a 24 minutos) do dia, podendo chegar a mais que 5,0% em condições desfavoráveis;
- tolerância para a fadiga: tempo para descanso, em média 6,25% (30 minutos) do dia;
- tolerância de espera: tempos de esperas para ajustamentos ligeiros, alinhamento de equipe, quebra de ferramentas como brocas, tempo perdido devido a variação ocasional no material e orientações pelos supervisores. Pode representar de 5,4% (26 minutos) a mais de 50,0% (4 horas) dependendo das condições de contorno do serviço.

Segundo Peinado e Graeml (2007), na prática observa-se uma tolerância entre 15% e 20% do tempo para trabalhos normais, em condições de ambiente normais. Pinto (2016) apresenta que, de forma geral, adota-se a tolerância para fadiga entre 10% e 15%.

Para remunerar os tempos de tolerância, diversos autores citam a utilização de um Fator de Eficiência (Fe), que minora a produção horária de um serviço. Por exemplo, de acordo com Mattos (2019), para



efeito de estimativa de custos, o orçamentista pode admitir uma hora de 45 ou 50 minutos, o que representa, respectivamente, fator de eficiência de 75% ou 83%.

De maneira geral, no âmbito da modelagem de custos, o tempo de ciclo das composições de custos unitários (CCUs) é um tempo normalizado de acordo com o ritmo do serviço, remunerando apenas o tempo efetivo de trabalho. Dessa forma, para remunerar o tempo de tolerância, faz-se necessária a aplicação do fator de eficiência.

Nesse íterim, o Manual de Metodologias e Conceitos do SICRO (DNIT, 2017) traz, a respeito do fator de eficiência, que, no SICRO 2, as CCUs eram diferenciadas pela natureza das obras, o que resultava na aplicação dos seguintes fatores de eficiência:

- construção rodoviária: eficiência de 50 minutos para cada 60 minutos, resultando no valor de 0,83;
- restauração rodoviária: eficiência de 45 minutos para cada 60 minutos, resultando no valor de 0,75;
- conservação rodoviária: eficiência de 40 minutos a cada 60 minutos, resultando no valor de 0,67.

Ainda de acordo com o mesmo Manual (DNIT, 2017), atualmente o SICRO utiliza o fator de eficiência no valor de 0,83 tanto para construção quando para restauração rodoviária, ocorrendo a diferenciação dos serviços apenas por meio da aplicação do Fator de Interferência de Tráfego, que majora o custo de execução do serviço em função do volume de tráfego local. De forma similar, para os serviços de conservação rodoviária, define-se um fator de eficiência de 0,75, que também pode contar com ajustes por meio de aplicação do FIT.

Como exceção aos casos supracitados, a título de exemplo, atualmente, no SICRO, o serviço de fresagem descontínua apresenta um fator de eficiência equivalente a 0,41. Isso indica que, motivado pelas particularidades desse serviço, em um turno de 8 (oito) horas, a equipe que o executa atua de forma produtiva em apenas 3,28 horas.

De modo sintético, no SICRO, o fator de eficiência pode variar entre os valores de 0,41 a 0,83. O maior valor, de 0,83, representa um tempo produtivo de 50 minutos a cada 60 minutos, ou seja, a cada 1 (uma) hora. Considerando um turno de 8 (oito) horas, este fator de eficiência representa aproximadamente 80 minutos de tempos de tolerância, que, de acordo com as classificações e proporções de interrupções supracitadas, pode ser associado a 24 minutos de tolerância pessoal (i.e., 5,0% do turno diário), 30 minutos de tolerância para fadiga (i.e., 6,25%) e 26 minutos de tolerância para espera (i.e., 5,4%). Apesar de dependentes de diversos fatores, entende-se que estas parcelas se mostram coerentes no contexto em que a maioria dos serviços SICRO se inserem.

Para melhor entendimento dos tipos de tempos de tolerância e como estes impactam na determinação do fator de eficiência, segue, na figura 1, um exemplo de tempos de tolerância para utilização do Fator de Eficiência (Fe) de 0,83.

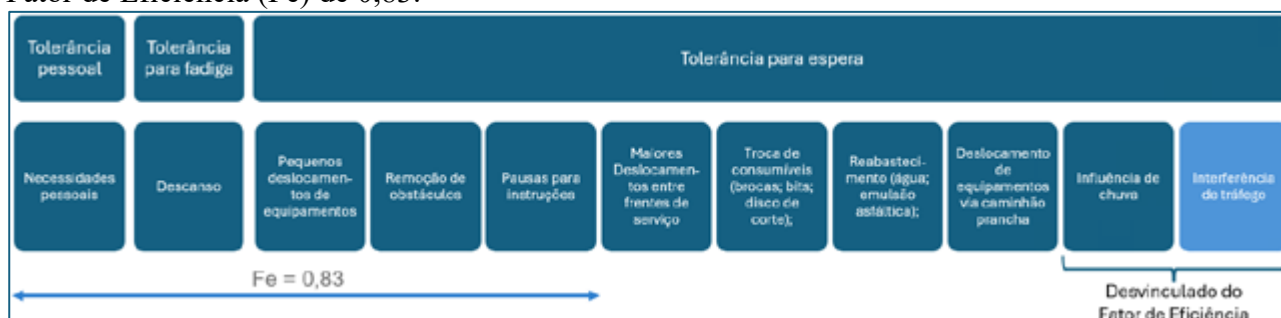


Figura 1. Tipos de tempos de tolerância



DOI: [10.29327/1430212.49-80](https://doi.org/10.29327/1430212.49-80)

PROPOSTAS DE MELHORIAS PARA REMUNERAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE TRÁFEGO EM OBRAS RODOVIÁRIAS

Conforme consta na figura 1, a interferência de tráfego é um tempo de tolerância que deve ser remunerado, porém, devido à sua particularidade, cujo tempo varia de acordo com as condições de contorno, não é possível determinar um valor fixo para incluí-lo dentro do fator de eficiência, sendo necessário, da mesma forma que aplicado com a influência de chuvas, a criação de um fator específico.

Anteriormente, na metodologia do Sicro 2, o tempo de interferência do tráfego estava sendo considerado de modo integrado ao fator de eficiência para obras de restauração e de conservação. Atualmente, no SICRO, a interferência de tráfego foi retirada do fator de eficiência, o que possibilitou que a interferência do tráfego seja medida de acordo com a situação de cada projeto.

Em resumo, os tempos de tolerância referentes a influência de chuva e interferência de tráfego possuem fatores específicos, de acordo com as condições de contorno da obra, e, por essa razão, acompanham metodologia própria.

Metodologia atual

O Fator de Interferência do Tráfego – FIT foi criado para remunerar a perda de produtividade dos serviços que são executados sob influência do tráfego de veículos. Obras de duplicação, restauração, conservação de vias, construção de terceira faixa, melhoramentos de infraestrutura de transportes, ou seja, aquelas desenvolvidas em paralelo às estruturas concluídas e em presente funcionamento, são obras que sofrem forte influência do tráfego de veículos em suas proximidades, pois é necessário interditar a pista ou colocar em execução medidas de segurança para a prevenção de acidentes (DNIT, 2017).

Vale mencionar que uma das premissas de aplicação do FIT é de que as medidas de segurança referentes à sinalização temporária de obras para prevenção de acidentes são remuneradas por suas composições de custos reunidas no Grupo 52 do SICRO, o grupo de serviços de sinalização.

Atualmente, o FIT incide apenas sobre o custo de mão de obra e equipamentos, ou seja, sobre o custo horário dos serviços, e, conseqüentemente, não incide sobre os materiais e atividades auxiliares. Ainda, o FIT é calculado por duas parcelas: o Volume Médio Diário de Tráfego e a Proximidade dos Centros Urbanos.

Em relação à proximidade de centros urbanos, que pode causar a redução da produção de serviços por conta de congestionamentos, necessidade de cautela ao dividir espaço com pedestres, bicicletas e motocicletas, vandalismos e roubos, entre outros, a metodologia adota um percentual de 5,0%.

Em relação ao Volume Médio Diário – VMD, que é o número de veículos que trafegaram numa determinada seção de uma rodovia no período de 24 horas, a metodologia adota percentuais diferentes de acordo com o valor do VMD. Tal parâmetro define a demanda de uma via para elaboração de respectivos projetos e permite o planejamento de melhorias básicas. Conforme publicado:

- para VMD abaixo de 2.000 veículos, o FIT é de 0%;
- para um VMD acima de 11.000 veículos, o FIT é de 15%; e
- para um VMD entre 2.000 e 11.000 veículos, aplica-se a seguinte fórmula:

$$\text{FIT} = \left[\frac{(\text{VMD} - 2.000)}{600} \right] \% \quad (1)$$

A figura 2 demonstra a variação do valor do FIT de acordo com o VMD.

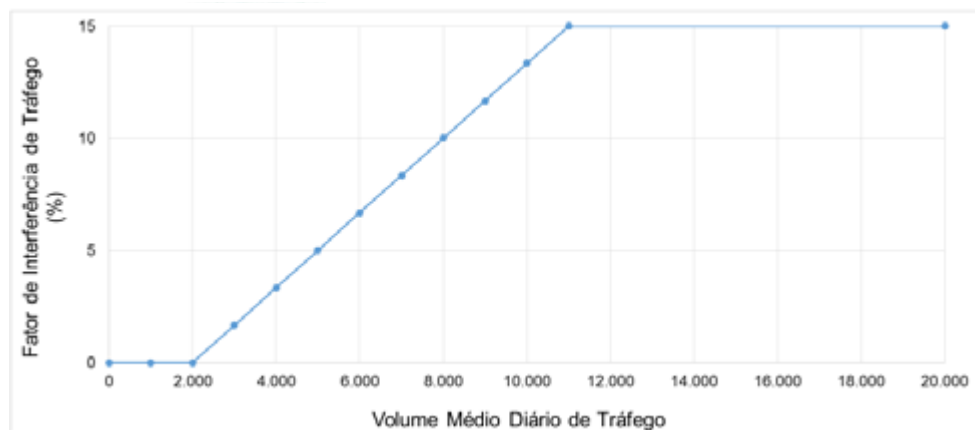


Figura 2 - Modelo matemático para cálculo do FIT. (DNIT, 2017)

Segundo DNIT (2017), tais porcentagens constam nos estudos realizados pelo Centro de Excelência em Engenharia de Transportes – CENTRAN.

Em caso de ocorrência concomitante de segmentos com elevado volume médio diário de tráfego, associado à proximidade de centros urbanos, o SICRO admite a aplicação no orçamento de um Fator de Interferência de Tráfego de até 20%.

MÉTODO

Além da revisão bibliográfica, também foram realizadas coletas de dados de campo, implicando na constatação de que em obras bem-sinalizadas, neste caso se referindo à sinalização de obras, não há interferência direta do tráfego nos serviços executados dentro do pano sinalizado. Dessa forma, a aplicação do FIT deve incidir apenas sobre a parcela de momento de transporte das composições de custos unitários do SICRO. Ou seja, a aplicação do FIT ocorre apenas no transporte de insumos, excluindo-se a parte de tempo fixo, uma vez que as atividades de carga, manobra e descarga ocorrem dentro da área sinalizada da obra, nos pátios dos fornecedores e/ou no canteiro de obras.

Para simulação das velocidades de tráfego com interferências que ocasionam redução da velocidade média, utiliza-se softwares de sistema de informação geográfica e de engenharia de tráfego.

O software VISSIM, desenvolvido pela empresa Planung Transport Verkehr – PTV, é um microsimulador altamente sofisticado que oferece uma capacidade de simular o tráfego de pedestres e veículos, além de fornecer uma variedade de opções para analisar diferentes modos de transporte, interseções e redes viárias.

A simulação de tráfego desempenha um papel fundamental na tomada de decisões relacionadas ao planejamento de infraestrutura, otimização do tráfego em tempo real, segurança rodoviária, previsão de demanda e avaliação de impactos de projetos de transporte, entre outros.

Segundo Portugal (2005), esses modelos permitem a incorporação da variabilidade da demanda, sendo usados para validar expressões analíticas e representar situações complexas. Embora a criação de um modelo de simulação demande esforço inicial, ele permite representar diversas situações de projeto de forma rápida e econômica, especialmente no contexto do tráfego.

Conforme definido pela Federal Highway Administration – FHWA (2004), os modelos de simulação de tráfego podem ser categorizados em três diferentes abordagens, a saber:



DOI: 10.29327/1430212.49-80

PROPOSTAS DE MELHORIAS PARA REMUNERAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE TRÁFEGO EM OBRAS RODOVIÁRIAS

- macroscópica: refere-se ao comportamento de grandes grupos de veículos, considerando variáveis como densidade, velocidade média e fluxo, sendo apropriada para planejamento de redes de transporte em larga escala;
- mesoscópica: situa-se entre a macroscópica e a microscópica, abordando grupos menores de veículos ou subáreas da rede de transporte, sendo utilizada em estudos de sistemas de transporte em nível intermediário;
- microscópica: lida com veículos individuais, considerando detalhes como o comportamento dos motoristas, interações entre veículos e as condições da estrada em tempo real, sendo amplamente empregada em análises de engenharia de tráfego, simulações de cenários específicos e avaliações de segurança rodoviária.

De acordo com Portugal (2005), na simulação é comum utilizar sequências de números pseudoaleatórios, que são gerados seguindo regras predefinidas, de forma que possam ser reproduzidos. Existem diversas técnicas para criação dessas sequências. No entanto, é necessária a realização de testes estatísticos visando estabelecer um grau de aleatoriedade satisfatório para a aplicação destes valores.

Foi utilizada uma abordagem de simulação microscópica para entender o comportamento do tráfego em rodovias pavimentadas a partir de diferentes volumes de tráfego e interferências de serviços executados ao longo de trechos rodoviários. Essa escolha se deve à necessidade de uma análise com maiores detalhes das interações individuais dos veículos em cenários realistas, considerando sua dinâmica, reações aos obstáculos e às condições da estrada.

Através da realização de microssimulações em rodovias utilizando o software VISSIM, abrangendo tanto vias simples quanto duplas com diferentes volumes de tráfego diário, foi detectada uma diminuição da velocidade média de deslocamento a partir do valor do VMD por faixa, sendo chamado de atraso A1. Essas simulações foram realizadas sobre duas óticas:

- fluxo habitual de tráfego: tempos de percurso aferidos apenas pelas interferências do volume de tráfego diário, assim como devido às características geométricas da via;
- influência de serviços rodoviários: tempos de percurso aferidos a partir da obstrução de uma das faixas de trânsito.

Segue, nas figuras 3 e 4, um exemplo de resultado da simulação de pista simples com fluxo livre.

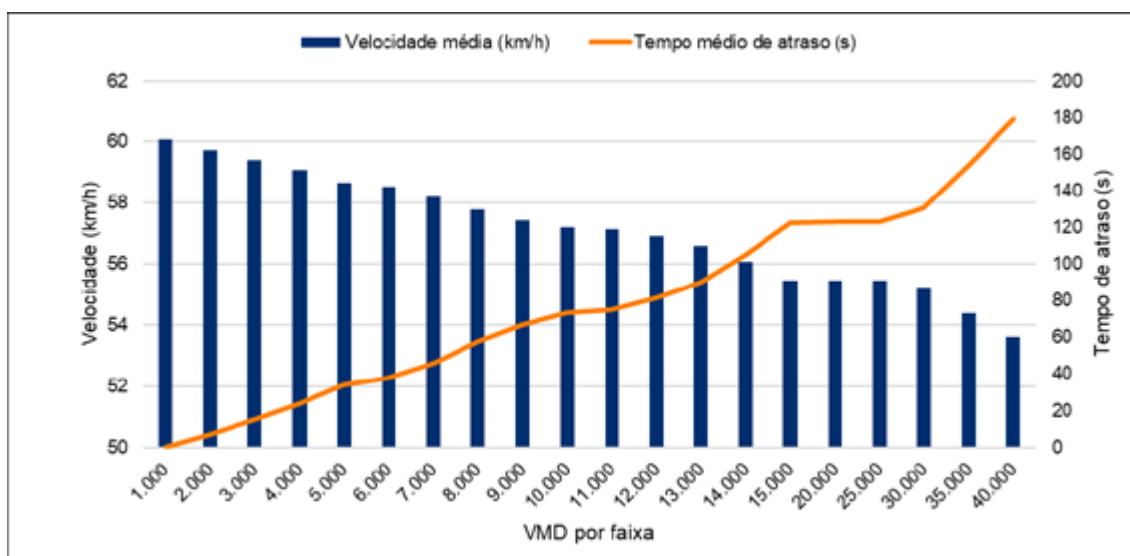


Figura 3 - Resultado de dados do VISSIM para pista simples com fluxo livre



Figura 4 - Simulação do VISSIM para pista simples com fluxo livre em VMD de 40.000 por faixa

Conforme pode ser observado na figura 3, não foi identificado um limite superior para o valor do VMD por faixa. Em relação ao limite inferior, o estudo levantou dados das rodovias brasileiras concluindo que a velocidade média de transporte em rodovia pavimentada do SICRO está definida para a situação mais comum, que se trata de rodovias de pista simples com VMD inferior a 2.000, ou seja, 1.000 por faixa. Através das simulações operacionais, observou-se que o impacto no fluxo de transporte ocorre, em grande parte dos casos, quando o VMD por faixa excede 1.000 veículos, situação esta em vias majoritariamente pavimentadas. Para as demais classificações (i.e., leito natural e revestimento primário), os volumes não caracterizam níveis elevados de fluxo.

Dessa forma, o estudo concluiu que, para VMD até 1.000, por faixa, a velocidade adotada deve ser igual a 60 km/h. Acima desse limite, no entanto, a velocidade média é reduzida linearmente em função do valor do VMD.

Com a simulação de tráfego alternado foi detectado um segundo impacto da velocidade média, desta vez relacionado ao tempo de espera das operações de “PARE” e “SIGA”, intitulado de atraso A2, que ocorre em serviços que tenham possibilidade de induzir a ocupação da área da pista ou do acostamento durante a execução, que, em pistas simples, resultam em tráfego alternado.

Em relação à análise da influência urbana, foi utilizado o sistema de informação geográfica – GIS, que possibilita conectar dados a um mapa, integrando sistema de localização com diversos tipos de informações descritivas, criando camadas de trabalho, denominadas *shapes*.

A aplicação dos *shapes* (i.e., camadas) no tratamento de dados geoespaciais utilizando o software QGIS desempenha um papel fundamental na análise, representação e interpretação de informações relacionadas à geografia e ao espaço. De acordo com a Documentação para QGIS 2.18 (QGIS, 2019), o termo *shapes* refere-se aos arquivos no formato shapefile, que são amplamente utilizados para armazenar dados geoespaciais, como pontos, linhas e polígonos, juntamente com seus atributos associados.

Essas estruturas de dados altamente organizadas permitem armazenar informações geográficas de maneira eficiente. No tocante aos dados de entrada, foram utilizadas as seguintes bases:

- áreas urbanizadas: coordenadas geográficas da designação das áreas com interferências humanas a partir da classificação do IBGE;
- Sistema Nacional de Viação – SNV: constituído pela infraestrutura física e operacional dos vários modos de transporte de pessoas e bens, sob jurisdição dos diferentes entes da Federação, nos regimes público e privado.

Em relação à interferência de áreas urbanas, com o objetivo de identificar a velocidade média nos trechos que se caracterizam pelo entorno dos centros urbanos, procedeu-se com a extração e avaliação dos dados de extensão de rodovias que contornam as áreas urbanizadas. Em posse desses dados, as



DOI: [10.29327/1430212.49-80](https://doi.org/10.29327/1430212.49-80)

PROPOSTAS DE MELHORIAS PARA REMUNERAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DE TRÁFEGO EM OBRAS RODOVIÁRIAS

velocidades foram obtidas através de programação em API do Google, a partir das coordenadas geradas da sobreposição dos *shapes* descritos. Para o transporte de insumos em vias pavimentadas que não sejam rodovias federais ou estaduais, a velocidade média de deslocamento é em média igual a 30 km/h, sendo estas vias intituladas de vias urbanas. Dessa forma, foi detectada a significância de atrasos relacionados a tráfego em vias urbanas, sendo este um terceiro tipo de atraso, o atraso A3.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A metodologia atual do FIT trouxe grandes avanços à engenharia de custos de infraestrutura, como a retirada do tempo de interferência de tráfego de dentro do Fator de Eficiência (Fe), possibilitando a criação de um fator específico que se adequa de acordo com as condições de contorno de cada projeto. No entanto, a metodologia pode ser aprimorada, e com as análises de dados obtidos de referências bibliográficas, coletas de campo e simulações operacionais de tráfego, foram detectados três tipos de atrasos que impactam diretamente nas velocidades de tráfego: A1, referente à redução de velocidade média com aumento de VMD por faixa; A2, referente à redução de velocidade média em função de existência de tráfego alternado; e A3, referente ao tráfego em vias urbanas.

Com base nos três tipos de atrasos detectados, é possível realizar uma atualização da metodologia com a criação de um novo FIT, que traz dados bem fundamentados para remuneração da interferência de tráfego, a qual, conforme detectado no estudo, ocorre apenas durante o transporte de insumos.

Para atualização da metodologia, é necessária uma proposta de novo layout das CCUs do SICRO, trazendo uma coluna para apresentação do valor do FIT dentro da parcela de momento de transporte. No tocante à transparência na aplicação do FIT em casos de CCUs auxiliares, ressalta-se a recomendação de que todas as CCUs empregadas em um orçamento sejam divulgadas, incluindo as auxiliares. Assim, embora o FIT seja explicitado na parcela relativa ao momento de transporte, sua aplicação também pode ser verificada nas CCUs auxiliares, na parcela relativa ao momento de transporte.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os novos parâmetros propostos, conclui-se que a atualização da metodologia do FIT trará ganhos significativos na remuneração das interferências de tráfego em obras rodoviárias, resultando em uma avaliação mais justa e precisa dos custos associados a esse importante aspecto da construção de rodovias.

Em resumo, a metodologia aprimorada proporciona uma remuneração mais equitativa e bem fundamentada, refletindo de maneira mais precisa as interferências de tráfego e suas implicações financeiras nas obras rodoviárias. Este avanço representa um passo importante para a gestão eficiente dos custos no setor de infraestrutura, beneficiando não apenas os gestores e executores das obras, mas também a sociedade como um todo, ao promover uma utilização mais responsável e eficaz dos recursos públicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APANAVIČIENĖ, R.; DAUGĖLIENĖ, A. New classification of construction companies: overhead costs aspect. **Journal of Civil Engineering & Management**, vol.17, n.4, 2011

BAKRI, A. S.; RAZAK, M. A. A.; ABD SHUKOR, A. S. Identification of factors influencing time and cost risks in highway construction projects. **International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology**, vol.12, n.3, p. 280-288, 2021.

BECKER, T.C.; JASELSKIS, E.J.; EL-GAFY, M. Improving predictability of construction project outcomes through intentional management of indirect construction costs. **Journal of Construction Engineering and Management**, vol.140, n.6, 2014.



CHOI, J. Quantifying the effects of interference for an alternative method of construction productivity estimation. **KSCE Journal of Civil Engineering**, vol.15, n.5, p. 761-769, 2011.

CHOI, J.; RYU, H. Statistical analysis of construction productivity for highway pavement operations. **KSCE Journal of Civil Engineering**, vol.19, n.5, p. 1193-1202, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de custos de infraestrutura de transportes**. Brasília, DF: DNIT, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>. Acesso em: 28 de abril de 2024.

_____. **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723_manual_estudos_trafego.pdf. Acesso em: 28 de abril de 2024.

ELLIS, R.D.; LEE, S.H. Measuring project level productivity on transportation projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, vol.132, n.3, p. 314-320, 2006.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA. **Estudos de tráfego**. Brasília, DF: EPL, 2019. Disponível em: <https://antt.gov.br/documents/359170/710124/Estudos+de+Tr%C3%A1fego.pdf/7c264949-2f2a-a0d6-152d-3021c0338384?t=1592842079107>. Acesso em: 28 de abril de 2024.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Work zone safety**. Washington D.C.: FHWA, 2023.

JIANG, Y. The effects of traffic flow rates at freeway work zones on asphalt pavement construction productivity. **Transportation Quarterly**, vol.57, n.3, p. 83-103, 2003.

LEE, E.B.; HARVEY, J.T.; IBBS, C.W.; ST MARTIN, J. Construction productivity analysis for asphalt concrete pavement rehabilitation in urban corridors. **Transportation Research Record**, vol.1813, n.1, p. 285-294, 2002.

LEE, E.B.; HARVEY, J.T.; THOMAS, D. Integrated design/construction/operations analysis for fast-track urban freeway reconstruction. **Journal of Construction Engineering and Management**, vol.131, n.12, p. 1283-1291, 2005.

MATTOS, A. D. **Como preparar orçamentos de obras**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

PEINADO, Jurandir; GRAEML, Alexandre Reis. **Administração da produção: operações industriais e de serviços**. Curitiba: UnicenP, 2007.

PIÑA, A. B. S. (2021). **Framework para relacionar fatores de riscos em contratos de concessões rodoviárias**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 137p.

PINTO, V. R. C. **Engenharia de métodos**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2016.

PORTUGAL, L. S. **Simulação de tráfego: conceitos e técnicas de modelagem**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

QGIS Project. **QGIS user guide release 2.18**. QGIS, 2019. Disponível em: https://docs.qgis.org/2.18/pdf/pt_PT/QGIS-2.18-UserGuide-pt_PT.pdf. Acesso em: 28 de abril de 2024.

RIQUETI, A. C. **Estudo de volume de tráfego e nível de serviço na alta e baixa temporada da rodovia SC-401**. Monografia (TCC), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

SLIUPAS, T.; RADVILAVICIUS, R.; ANTANAVICIUS, T. Interaction between population in a road section are and AADT. AADT forecasting using area population and traffic research data form neighbouring road sections. In: **Proceedings of 10th International Conference on Transport Means**, 2006. p. 143-146.

VYAS, T.; VARIA, H. R. Impact of construction work zone on urban traffic environment. **International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems**, vol.16, n.1, 2023.

WONG, E.; SWEI, O. New construction cost indices to improve highway management. **Journal of Management in Engineering**, vol.37, n.4, 2021.



PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA PERÍCIA NAS DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTES EM OBRAS RODOVIÁRIAS

João Paulo Ferreira de Lacerda¹; Benaffe Santos Cardoso de Almeida¹; Flávio Santos Sousa Costa²; Antonio Júnior Alves Ribeiro¹ & Suelly Helena de Araújo Barroso²

RESUMO

A seleção do caminho de serviço para a movimentação de material na construção de rodovias impacta diretamente na produtividade dos equipamentos, sendo comum considerar apenas a menor DMT (Distância Média de Transporte) visando reduzir o custo, onde um dos seus aspectos mensura a distância percorrida pelos equipamentos de transporte do ponto de extração até o ponto médio da área de aplicação, estabelecendo os encargos e custos estimados durante todo o processo, refletindo, portanto, na economia de tempo de construção e orçamento. Embora haja a indicação de DMTs a serem adotadas no projeto, é razoável levantar a possibilidade de que os valores sugeridos não correspondam ao menor trecho entre as ocorrências e suas áreas de aplicação em campo, podendo acarretar no superfaturamento por excesso de quantitativos e custos de transportes contratados. Este trabalho objetiva apresentar e validar uma metodologia para avaliar se as DMTs indicadas nos projetos são, de fato, as mais econômicas na execução rodoviárias. A metodologia de análise consiste na indicação da aquisição de diversos dados de distintas fontes para a construção de base de dados para possibilitar a realização de cruzamento de informações, localização de possíveis fontes alternativas de materiais e análises espaciais. O principal algoritmo utilizado é o de roteamento, que é capaz de avaliar as menores rotas. A metodologia foi aplicada em um projeto rodoviário do estado do Ceará. Com a aplicação observou-se a possível discrepância nas DMTs propostas, e a presença de fontes alternativas de materiais de mesma qualidade, o que pode acarretar em diferenças significativas no valor do projeto, gerando impactos negativos no orçamento da obra analisada.

PALAVRAS-CHAVE: DMT; obras rodoviárias; orçamento; SIG.

ABSTRACT

It is common to consider only the shortest AHD (Average Haul Distance) to reduce costs, where one of its aspects measures the distance traveled by transport equipment from the point of extraction to the mid-point of the application area, establishing the estimated charges and costs throughout the process, thus reflecting savings in construction time and budget. Although there is an indication of AHDs to be adopted in the project, it is reasonable to raise the possibility that the suggested values do not correspond to the shortest stretch between the occurrences and their areas of application in the field, which could lead to overbilling due to excess quantities and contracted transportation costs. This work aims to present and validate a methodology for assessing whether the AHDs indicated in projects are, in fact, the most economical for road construction. The analysis methodology consists of the acquisition of data from different sources to build a database for cross-checking information, locating possible alternative sources of materials, and spatial analysis. The main algorithm used is routing, which can evaluate the shortest routes. The methodology was applied to a road project in the state of Ceará. The application revealed a possible discrepancy in the proposed AHDs and the presence of alternative sources of materials of the same quality, which can lead to significant differences in the value of the project, generating negative impacts on the budget of the work analyzed.

KEY WORDS: DMT, road works, budget, SIG

¹ Instituto Federal do Ceará, e-mail: jpaulolacerda47@gmail.com; benaffelima@gmail.com; junior.ribeiro@ifce.edu.br.

² Universidade Federal do Ceará, e-mail: flavio.santos150998@gmail.com; suelly@det.ufc.br.



INTRODUÇÃO

De acordo com a Lei nº 467 (1937) e o Decreto nº 3082 (1938), o Brasil iniciou seu processo de ascensão em malhas rodoviárias em 1937 com a criação do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem) que tinha por competência a execução, fiscalização e obras de melhoria das estradas de rodagem nacionais. Em 1945, o DNER passou por algumas modificações e em junho de 2001, a partir da lei nº 10.233, reestruturou-se criando o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), sendo o órgão que rege as regulamentações das malhas rodoviárias do país.

Desde a fundação do DNER até a reorganização para formar o DNIT, a evolução das malhas rodoviárias no Brasil reflete a história institucional do país na administração e regulamentação das estradas, bem como o crescente entendimento da importância da construção física e das considerações sociais e ambientais envolvidas na movimentação de materiais durante o processo. Enquanto o DNER inicialmente se concentrava na execução e melhoria das estradas do país, o DNIT tornou-se o órgão regulador das malhas rodoviárias. O novo departamento leva em consideração os efeitos sociais e ambientais das decisões de trajetória e movimentação de materiais durante a construção, além da eficiência econômica.

A movimentação de material se constitui como um fator de extrema importância na construção de uma rodovia, concentrando-se na escolha eficiente da frota para otimizar a produtividade, o que faz-se necessário um bom planejamento e estudo da área em que será realizado uma malha rodoviária ou revitalização, analisando-se a jazidas de extração ativas, constituintes da área de entorno e assim escolher o melhor caminho. A seleção do caminho de serviço impacta diretamente na produtividade dos equipamentos, sendo comum considerar apenas a menor DMT (Distância Média de Transporte) visando reduzir o custo com transporte. Porém, essa decisão dos caminhos não afeta apenas economicamente, mas também gera impactos ambientais e sociais, como desmatamento e poluição sonora em áreas urbanas (ALMEIDA, 2021).

Assim, a pertinência deste procedimento é embasada na razão de que, embora o projetista tenha indicado as DMTs a serem adotadas, é razoável levantar a possibilidade de que algumas DMTs sugeridas pelo projetista não correspondam ao menor caminho entre as fontes de materiais, água, e as áreas de aplicação em campo, ou que ainda estejam equivocadas por outra razão. Essa prática pode acarretar no superfaturamento por excesso de quantitativos e custos de transportes contratados nessas obras, pois as DMTs de projeto são incompatíveis com as DMTs que estão sendo medidas efetivamente e de fato executadas.

Portanto, este trabalho tem por objetivo avaliar, a partir da metodologia aqui apresentada, se as DMTs utilizadas na distribuição de materiais previstas em projeto estão corretas e poderiam ser efetivadas durante a execução das obras rodoviárias ou se existem caminhos menores ou outros locais de menores distâncias com materiais disponíveis e que podem estar sendo utilizados em detrimento dos apontados em projetos.

REFERENCIAL TEÓRICO



DOI: [10.29327/1430212.49-78](https://doi.org/10.29327/1430212.49-78)

PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA PERÍCIA NAS DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE SEM OBRAS RODOVIÁRIAS

Geoprocessamento na avaliação das DMTs

A DMT mensura a distância percorrida pelos equipamentos de transporte do ponto de extração até a ponto final de aplicação, sendo esse cálculo feito separando essa distância em duas partes, sendo elas o percurso da jazida até a estaca inicial, denominada de distância fixa, e a média da extensão a ser aplicado o material na obra rodoviária. Uma DMT otimizada reflete em uma economia de tempo de construção, visto que o material chega mais rápido até o seu destino, e economia orçamentária já que o valor do transporte do material é calculado considerando-se o volume do mesmo pela extensão transportada. (LOPES, *et al*).

O estudo do transporte de material deve ser realizado considerando o tipo de veículos que irão circular, o caminho mais curto e as condições em que vai ocorrer o deslocamento dos veículos, por se tratar de uma etapa que não afeta somente a parte econômica do projeto como um todo, esse está diretamente ligado a impactos ambientais e sociais, além do mais os custos de cada DMT são calculados de acordo com cada trecho e distância a ser percorrido e o tipo de material transportado, sendo esses custos definidos em função da fonte orçamentária aplicada. (ALMEIDA, 2021)

O geoprocessamento, através de técnicas matemáticas e computacionais, realiza o tratamento de informações geográficas, com aplicabilidade em várias áreas do conhecimento, contribuindo fortemente com os processos de análise de recursos naturais, transporte e planejamento urbano e regional (RIBEIRO, 2018). A diversificação do SIG quanto a capacidade de armazenar, georreferenciar e unificar diversos bancos de dados espaciais, possibilita uma análise ampla acerca do emprego de softwares (QGIS) no transporte de materiais, sendo capaz de estabelecer localização de fontes alternativas, rotas menores, dentre diversas outras possibilidades, eventualmente contribuindo com a redução de custos, no que se refere ao projeto de pavimentação.

Orçamento de Obras Públicas

O orçamento de obras públicas é essencial para a decisão do gestor público sobre a contratação e execução, permitindo ao engenheiro orçamentista estimar custos, planejar prazos e garantir transparência, possibilitando análise rigorosa dos órgãos de controle. Por sua vez, existe a necessidade de um banco de dados que oriente os órgãos governamentais, no que se refere ao custeio de licitações para projetos. (PEREIRA, 2018).

Para tal, adota-se, no estado do Ceará, a seguinte ordem de prioridade de sistemas referenciais de custos: SEINFRA, por meio do SIPROCE (Sistema de Preços, Serviços de Engenharia e Orçamento); SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil), produzido pelo IBGE e mantido pela Caixa Econômica Federal; SICRO (Sistema de Custos Referenciais de Obras), cuja responsabilidade cabe ao DNIT; outros sistemas referenciais de custos mantidos por órgãos ou entidades estaduais e municipais. (DAE, 2016)

Hoje, o DNIT fornece no SICRO-2 informações detalhadas sobre as composições dos serviços para cada estado brasileiro, incluindo índices de utilização, equipamentos, mão de obra, materiais e custos de insumos. A concepção dessas peças requer conhecimento técnico sobre execução,



materiais, mão de obra, equipamentos, produtividade dos insumos e se serviços preliminares são necessários. Existem duas partes principais, a primeira consiste em serviços fundamentais medidos e pagos, como a construção de alvenaria, e a segunda consiste em serviços auxiliares, como a fabricação de insumos ou partes da atividade. Apenas os componentes principais são afetados pela taxa de BDI (Bonificação e Despesas Indiretas). Composições podem ser horárias, unitárias ou ambas, mas no SICRO, geralmente são em formato misto para ajudar a entender melhor como os insumos são usados no serviço. (ALMEIDA, 2021)

A Caixa Econômica Federal mantém o SINAPI para definições técnicas de engenharia e o IBGE para pesquisa de preços, geralmente utilizada quando há aplicação de recursos públicos, não considerando a aplicação do BDI. No que diz respeito ao transporte de materiais, as técnicas foram adaptadas para lidar com diferentes condições de vias urbanas, como leito natural, revestimento primário e pavimentação. As composições cobrem distâncias de até 30 km e superiores, usando unidades em de momento de transporte, por volume (M3xKM) ou peso (TxKM) no momento do transporte. As condições específicas da via e da DMT determinam as velocidades médias adotadas. (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2023)

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

- Software SIG (ArcGIS/QGIS/gvSIG);
- *Google Earth Engine/OpenStreetMap*;
- Banco de dados referente a extração de material;
- Banco de dados rodoviário do estado da obra analisada;
- Documentação que disponibilize localização georreferenciada das ocorrências e estaqueamento.

Métodos

As etapas necessárias para aplicação da metodologia foram as seguintes:

- Definição dos trechos a serem trabalhados.
- Aquisição das bases cartográficas:
 - o Bases de rodovias federais, estaduais, municipais: coletados no site do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
 - o Bases de fontes de água: obtidos no site oficial da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH);
 - o Base do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM): obtidos através do Sistema de Informação Geográfica da Mineração (SIGMINE) os dados referentes a localização georreferenciada das jazidas no estado do Ceará; e
 - o Imagens de satélites atuais do estado do Ceará.
- Conversão em *shapefile* e vetorização dos trechos rodoviários dos projetos.
- Transformação dos polígonos da base do DNPM em pontos no centro de cada forma geométrica.



DOI: 10.29327/1430212.49-78

PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA PERÍCIA NAS DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE SEM OBRAS RODOVIÁRIAS

- Consolidação das bases cartográficas rodoviárias em uma única base para garantir o roteamento.
- Filtragem dos pontos de jazidas do DNPM para serem visualizados somente locais de extração de material compatíveis com os apresentados no projeto da obra analisada.
- Uso da função de roteamento “Análise de rede” aplicando a ferramenta “Caminho mais curto (Ponto para Ponto)”, utilizando como base do algoritmo a camada rodoviária dissolvida.
- Obtenção das distâncias calculadas através da calculadora de campo no software SIG utilizado.
- Comparação entre as distâncias de projetos e as calculadas por meio da metodologia.
- O impacto no orçamento foi estimado para três fontes de referência de custos: SEINFRA, SICRO e SINAPI:
 - o Todas com unidade TxKM (tonelada transportada para cada quilômetro rodado);
 - o Sem desoneração; e
 - o BDI (Benefícios e Despesas Indiretas) aplicado de 25%.

A Figura 01 traz a base cartográfica consolidada dentro do QGIS, para assim, permitir a aplicação do método de verificação de DMTs.

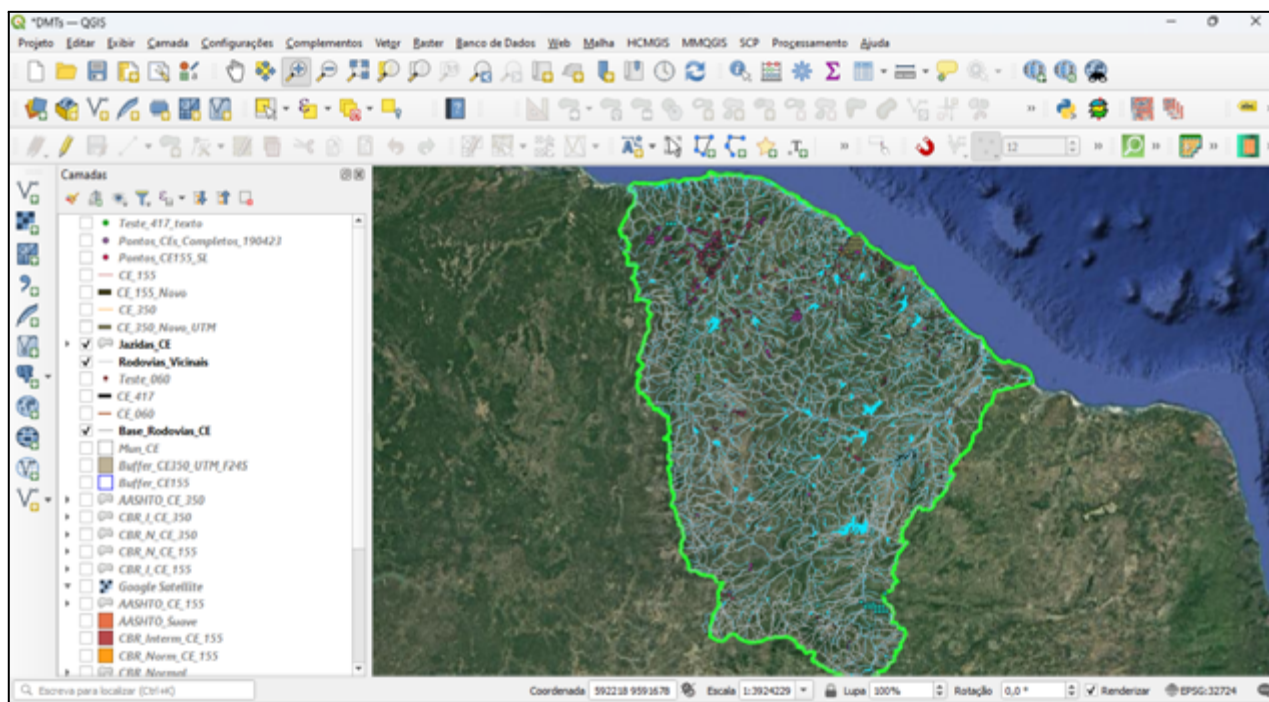


Figura 01 - Bases cartográficas para aplicação da metodologia de aferição de DMTs. (AUTORES, 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram testadas todas as ocorrências apresentadas no projeto fornecido para análise, a fim de determinar o trajeto que apresente diferenças significativas. A Tabela 01 demonstra os resultados



João Paulo Ferreira de Lacerda,
Benaffe Santos Cardoso de Almeida, Flávio Santos Sousa Costa,
Antonio Júnior Alves Ribeiro & Suelly Helena de Araújo Barroso

para cada ocorrência, exceto as fontes de captação de água e areia, os quais não foram disponibilizadas as DMTs no projeto:

Tabela 01 - Demonstrativo das distâncias e DMT's calculadas. (AUTORES, 2024).

OCORRÊNCIA	DISTÂNCIA FIXA (km)		DMT (km)	
	Projetada	Calculada	Projetada	Calculada
JAZIDA 01	0,70	0,72	5,11	5,13
JAZIDA 02	0,06	0,06	2,52	2,52
JAZIDA 03	6,44	6,30	8,12	7,98
JAZIDA 04	3,10	2,62	6,58	6,10
JAZIDA 05	0,08	0,08	2,76	2,76
JAZIDA 06	0,99	0,93	12,73	12,67
JAZIDA 07	0,40	0,40	6,49	6,49
JAZIDA 08	2,80	2,80	19,66	19,66
PEDREIRA (PB)	44,40	41,29	54,24	51,13

Diante dos dados, foi escolhido para um estudo minucioso acerca dos valores encontrados para a pedreira do projeto, por apresentar uma variação significativa em suas distâncias. As demais ocorrências foram desconsideradas por apresentarem pequenas variações, que caracterizam imprecisões na base de rodovias georreferenciadas.

Por meio da análise desenvolvida pelo *software*, comparou-se as distâncias projetadas e calculadas entre a pedreira fornecedora de brita (PB) para material de revestimento e a estaca de referência (PA) representados na Figura 02, onde constatou-se uma discrepância considerável entre as mesmas, variando em 3,11 km o percurso a menos da calculada para projetada.



DOI: 10.29327/1430212.49-78

PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA PERÍCIA NAS DISTÂNCIAS MÉDIAS
DE TRANSPORTE SEM OBRAS RODOVIÁRIAS

Figura 02 - Traçado calculado entre a pedreira (PB) e estaca inicial (PA) (AUTORES, 2024).

Com o banco de dados fornecidos pelo SIGMINE, foi possível a identificação de duas pedreiras, PC e PD, mais próximas do PA, com distâncias de 28,10 km e 11,12 km, respectivamente, sendo ainda menor do que a proposta, com diferenças de 16,30 km e 33,28 km da estaca de referência. A Tabela 02 traz um demonstrativo acerca das diferenças (DIF) entre as pedreiras encontradas em relação a pedreira utilizada na obra:

Tabela 02 - Demonstrativo das distâncias e DMT's calculadas para extração de brita. (AUTORES, 2024).

OCORRÊNCIA	DISTÂNCIA FIXA (km)	DMT (km)	DIF. (km)
DIST. PROJETO	44,40	54,24	-
PEDREIRA (PB)	41,29	51,13	3,11
PEDREIRA (PC)	37,94	37,94	16,30
PEDREIRA (PD)	20,96	20,96	33,28

É notório a diferença existente, diante dos valores encontrados para as pedreiras propostas pelo SIGMINE, podendo estas, eventualmente, serem utilizadas indevidamente por parte da empreiteira sem a devida autorização do órgão competente. A Figura 03 representa os traçados calculados pelo QGIS.



João Paulo Ferreira de Lacerda,
Benaffe Santos Cardoso de Almeida, Flávio Santos Sousa Costa,
Antonio Júnior Alves Ribeiro & Suelly Helena de Araújo Barroso

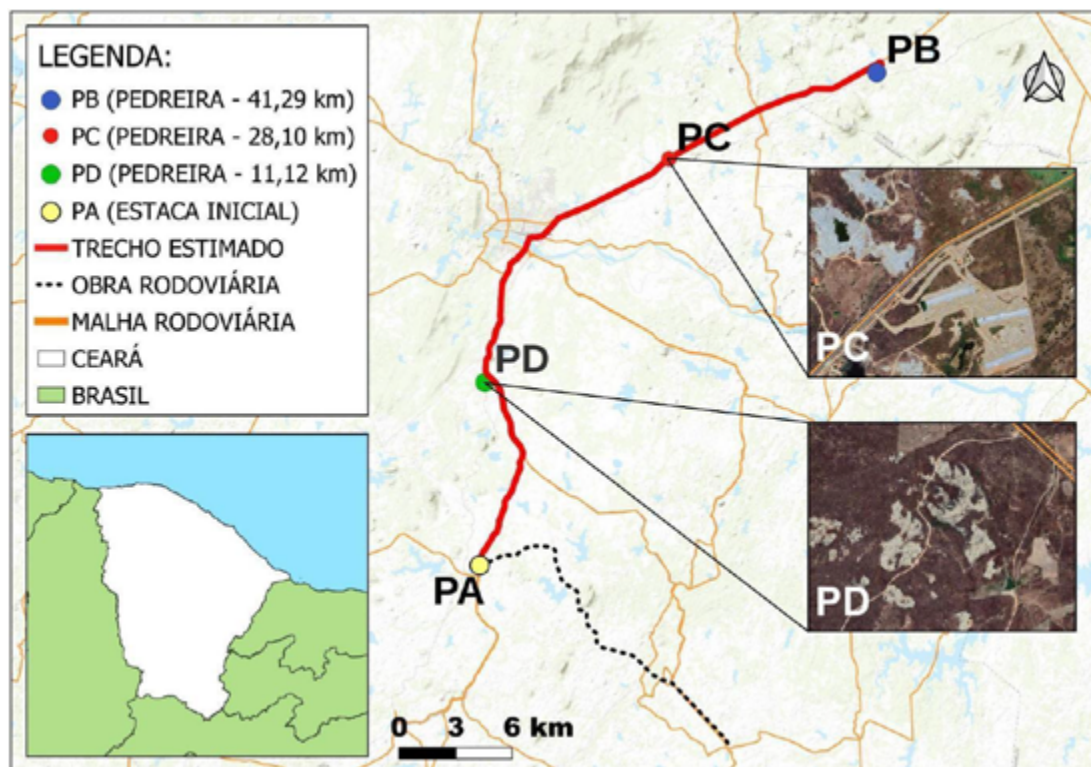


Figura 03 - Traçado calculado entre as pedreiras (PC e PD) e estaca inicial (PA): (AUTORES, 2024).

As divergências encontradas refletem impactos negativos no quadro orçamentário proposto para execução do projeto. A utilização do SIGMINE permitiu a identificação de novas áreas de extração do mesmo material constatado no projeto, possibilitando alternativas que apresentam melhor custo-benefício no orçamento. Além disso, foram utilizados diferentes referenciais de cálculo para estimativa da redução do valor gasto, caso adotadas as rotas desenvolvidas pelo método estudado.

Para a análise de custos referente à divergência no transporte de brita, a SEINFRA do estado do Ceará indica $(1,05x + 5,27)$ para o valor unitário (Versão 028), código C3312 - serviço referente a transporte local de brita p/ tratamentos superficiais, onde “x” corresponde a quilometragem da DMT. As demais fontes se baseiam em valores fixos para custo unitário com suas devidas especificações, expressos na Tabela 03:

DOI: [10.29327/1430212.49-78](https://doi.org/10.29327/1430212.49-78)PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA PERÍCIA NAS DISTÂNCIAS MÉDIAS
DE TRANSPORTE SEM OBRAS RODOVIÁRIAS

Tabela 03 - Referencial orçamentário para SEINFRA, SICRO e SINAPI. (AUTORES, 2023).

FONTE / CÓDIGO	DESCRIÇÃO	CUSTO UNITÁRIO	BDI	PREÇO UNITÁRIO
SEINFRA / C3312	Transporte local de brita p/ tratamentos superficiais.	6,32	25%	7,90
SICRO / 5914389	Transporte com caminhão basculante de 10 m ³ - rodovia pavimentada.	0,78	25%	0,98
SINAPI / 93595	Transporte com caminhão basculante de 10 m ³ , em via urbana em revestimento primário.	1,94	25%	2,43
SINAPI / 93596	Transporte com caminhão basculante de 10 m ³ , em via urbana pavimentada, adicional para DMT excedente a 30 km.	0,71	25%	0,89

A diferença nos preços unitários ocorre devido a forma com que são alocados no orçamento, principalmente no caso da SEINFRA que usa uma fórmula em que só uma parcela sofre variação. A SINAPI prevê custos variados a depender da extensão, com um valor unitário para DMT's até 30 km e, acima disso, a quilometragem passante terá um custo unitário diferente, sendo necessária a aplicação dos dois itens citados na Tabela 03.

A Tabela 04 mostra o impacto causado no orçamento após aplicação do método analisado no presente artigo, a partir de uma análise envolvendo o valor fornecido pelo projeto estudado (Proj.) e os valores calculados (Calc.), assim como um percentual de diferença entre os mesmos (DIF.), a VIAGEM é o produto da DMT pelo preço unitário tratado na Tabela 03 e o ORÇAMENTO representa aproximadamente o valor gasto para o transporte do material através da multiplicação entre a VIAGEM e a massa do material transportado (em toneladas).



João Paulo Ferreira de Lacerda,
Benaffe Santos Cardoso de Almeida, Flávio Santos Sousa Costa,
Antonio Júnior Alves Ribeiro & Suelly Helena de Araújo Barroso

Tabela 04 - Impacto orçamentário (AUTORES, 2023).

FONTE	OCORRÊNCIA	VIAGEM (R\$)	ORÇAMENTO (R\$)	DIF. (%)
SEINFRA	PROJ.	77,78	367.518,13	-
	PB	73,70	348.230,25	5,25%
	PC	56,38	266.427,31	27,51%
	PD	34,10	161.119,21	56,16%
SICRO	PROJ.	52,88	249.890,12	-
	PB	49,85	235.561,98	5,73%
	PC	36,99	174.794,09	30,05%
	PD	20,44	96.565,21	61,36%
SINAPI	PROJ.	94,26	445.416,24	-
	PB	91,50	432.373,96	2,93%
	PC	79,80	377.059,59	15,35%
	PD	50,83	240.175,01	46,08%

A Tabela 04 não tem o intuito de comparar os orçamentos para cada fonte de cálculo, mas sim compreender detalhadamente a economia em cada uma delas baseando-se nos dados fornecidos, sendo eles a quantidade de material e a DMT, tanto a planejada como a calculada. A Figura 04, apresenta os dados expressos na Tabela 04 no formato de gráfico de colunas, para uma visualização nítida acerca das diferenças descritas.

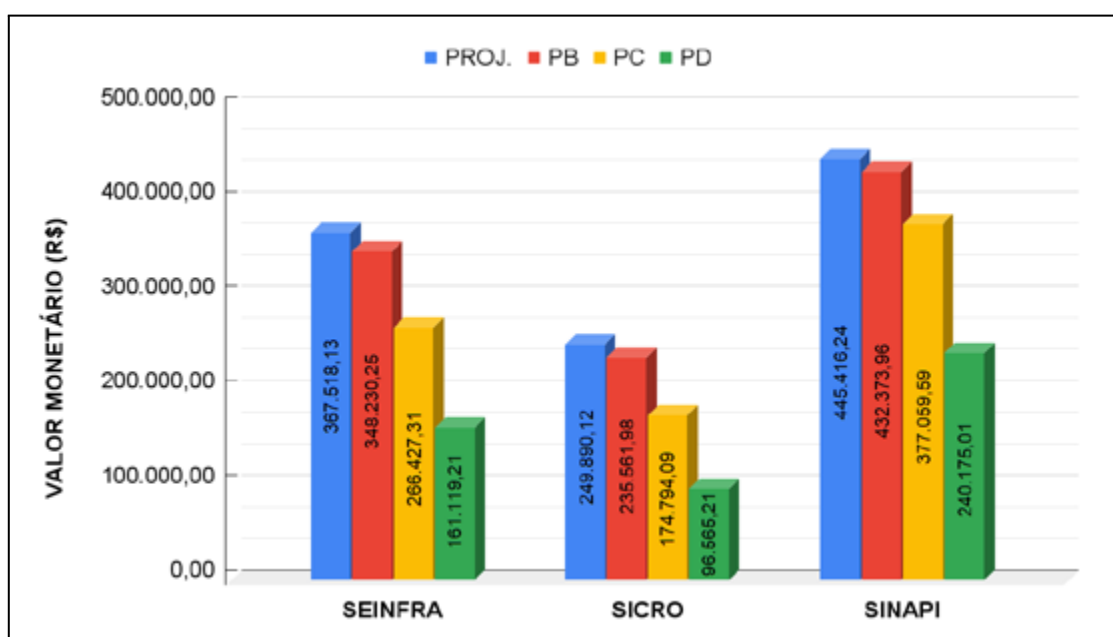


Figura 04 - Gráfico do impacto orçamentário (AUTORES, 2023).



DOI: [10.29327/1430212.49-78](https://doi.org/10.29327/1430212.49-78)

PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA PERÍCIA NAS DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE SEM OBRAS RODOVIÁRIAS

Observa-se a disparidade entre as distâncias presentes no projeto e as efetivamente calculadas, sendo ainda maior em relação às possíveis pedreiras encontradas através do SIGMINE, impactando diretamente o quadro orçamentário.

A diferença percentual faz o comparativo entre o orçamento do projeto e o das calculadas, sendo possível a visualização da economia no cálculo, em especial a SICRO que nota-se a maior discrepância entre os valores do projeto e as encontradas através do software, chegando a 61,36% em relação a pedreira PD.

Podendo ser sugerido a correção dos quantitativos de DMTs no orçamento com base nas novas distâncias médias de transportes e nas estimativas feitas para que assim possa gerar economicidade e eficiência ao gasto público.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método se mostrou capaz de identificar irregularidades e erros por parte dos projetistas, provavelmente por não ter em mãos dados suficientes para estipular o menor trajeto ou por falta de conhecimento do local. As ferramentas de geoprocessamento e georreferenciamento foram de grande importância na aplicação do método, através de uma coleta de dados de bancos confiáveis, sequer houve visitas de campo e foi identificadas várias possibilidades.

Com a metodologia aplicada no presente trabalho é possível verificar quantitativamente o custo-benefício na execução da obra, explicitando uma alternativa para evitar gastos desnecessários, evidenciando a redução apresentada na Tabela 03. A consolidação da técnica, pode também acarretar em melhorias para os órgãos regulatórios de obras rodoviárias, trazendo consigo agilidade no processo de fiscalização.

Além disso, é comum que a executora dos serviços faça levantamentos primitivos (geotécnicos e topográficos) e exploratórios cartográficos da região do empreendimento, com o intuito de mapear jazidas de materiais, corpos d'água, redes comerciais/logísticas, etc. De posse de tais informações e com mais recursos que o projetista, as empreiteiras podem, eventualmente, encontrar caminhos mais curtos entre as fontes de materiais e água indicados nos projetos e as áreas de aplicações ou descartes.

Por fim, com o auxílio de técnicas de levantamento topográfico, após uma visita ao local da obra, complementando o banco de dados já existente, seria possível a identificação de outras rotas alternativas, tendo em vista o *delay* existente entre os dados coletados com sistemas de informação geográficas e a situação real da obra presenciada em campo. Portanto, a conciliação entre as técnicas presente no artigo e a vistoria em campo, podem contribuir para a eficiência da fiscalização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Sistema de Informações Geográficas da Mineração - SIGMINE**. Disponível em:



<<https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908>>. Acesso em: 2 de setembro de 2023.

ALMEIDA, Andrezza Rayanne Alves de. **Determinação dos custos de Caminhos de Serviço utilizando o algoritmo de Least-Cost com auxílio do QGIS**. 2021.

BRASIL. Decreto nº 3082, de 17 de setembro de 1938. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 set. 1938. Disponível em:

<<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-3082-17-setembro-1938-348861-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 20 de setembro de 2023.

BRASIL. Lei nº 467, de 31 de julho de 1937. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 31 jul. 1937. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1930-1939/lei-467-31-julho-1937-555595-publicacaooriginal-74903-pl.html>>. Acesso em: 20 de setembro de 2023.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. (2023). SINAPI Metodologias e Conceitos. 9ª edição. Caixa econômica federal. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-manual-de-metodologias-e-conceitos/Livro1_SINAPI_Metodologias_e_Conceitos_9_Edicao.pdf>

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Sumário de Publicações e Documentação do Sinapi. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-composicoes-afetadas-sumario-composicoes-afetadas/SUMARIO_DE_PUBLICACOES_E_DOCUMENTACAO_DO_SINAPI.pdf>. Acesso em: 10 de novembro de 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Sistemas de Custos - SICRO**. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistem-as-de-custos/sicro>>. Acesso em: 6 de novembro de 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Bases Cartográficas Contínuas do Brasil**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/basescartograficas/#/mapa>>. Acesso em: 31 de agosto de 2023

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). Ceará em mapas interativos. Disponível em: <http://mapas.ipece.ce.gov.br/i3geo/interface/black_gm.phtml>. Acesso em: 31 de agosto de 2023

LOPES, L.R.F.; *et al.* **Análise da redução da distância média de transporte (DMT) de uma mina de calcário no Centro Oeste de Minas Gerais**. Revista Engenharia de Interesse Social; ano 8, v. 8, n. 10, p. 100-126; jan.-abr., 2023; ISSN: 2525-6041.

Manual de Obras Públicas e Serviços de Engenharia: recomendações básicas para contratos e convênios no âmbito do Estado do Ceará / Caio Petrônios de Araújo Lopes, Fagner Kellynson de Freitas Tavares, José Benevides Lôbo Neto, Lya de Araújo Braga Scipião, Narah Raket Diógenes Holanda e Valderina Cavalcante do Carmo. [autores]. – Fortaleza:2016.

PEREIRA, EDUARDO A. S. (2018). Avaliação dos Custos de Canteiros de Obras Rodoviárias de acordo com o Novo Sistema de Custos Referenciais de Obras - SICRO. Monografia de Especialização, Instituto Serzedello Corrêa, Tribunal de Contas da União, Centro Interdisciplinar de Estudos em Transportes, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88p.

RIBEIRO, Antonio Júnior Alves; DA SILVA, Carlos Augusto Uchôa; DE ARAÚJO BARROSO, Suelly Helena. Metodologia de baixo custo para mapeamento geotécnico aplicado à pavimentação. Transportes, v. 26, n. 2, p. 84-100, 2018.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA DO ESTADO DO CEARÁ. **Tabela de Custos - Versão 028 - ENC. SOCIAIS 114,15%**. Disponível em: <<https://sites.seinfra.ce.gov.br/siproce/onerada/html/23.1.html?a=1620068745166>>. Acesso em: 6 de novembro de 2023.

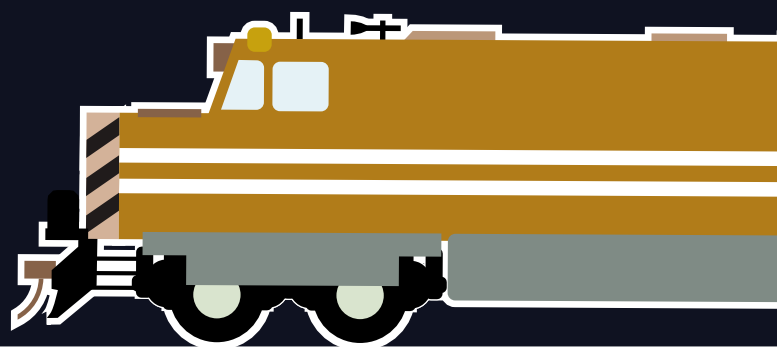


26° Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br



ABDER



**MATERIAIS DE
PAVIMENTAÇÃO - LIGANTES
ASFÁLTICOS, SOLOS E
AGREGADOS**

PROGRAMAÇÃO
TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS E ESTUDOS DE CASOS DE OBRAS
Quinta-feira, 22 de agosto

SALA ABAIS		
MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO - LIGANTES ASFÁLTICOS, SOLOS E AGREGADOS (ST09)		
⌚ 09:20	TT584	SELEÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR DESEMPENHO CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA
⌚ 10:40	TT718	APLICAÇÃO DE UM MÉTODO OTIMIZADO DE CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES A PARTIR DE SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS
⌚ 11:00	EC605	COMPORTAMENTO RESILIENTE DE BRITA GRADUADA SIMPLES DE UM TRECHO DA RODOVIA BR-116/RS
⌚ 11:20	TT016	INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE TRÊS MATERIAIS GRANULARES NÃO LATERÍTICOS
⌚ 11:40	TT668	COMPORTAMENTO RESILIENTE DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO PAVIMENTO DO AEROPORTO DE DOURADOS/MS
⌚ 12:00	TT332	ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO ESPERADO DE SOLOS TROPICAIS DE GRANULOMETRIA TRANSICIONAL
⌚ 12:20	EC587	TRINCAS NA SUB-BASE EM UM SOLO DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO – ESTUDO DE CASO
⌚ 12:40	TT329	UTILIZAÇÃO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA ANÁLISE DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS TROPICAIS E PREDIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO MCT



SELEÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR DESEMPENHO CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA

Victória Nunes-Ramos¹; Luciano Pivoto Specht¹; Silvio Lisboa Schuster¹; Luiz Guilherme Rodrigues de Mello² & Luiz Heleno Albuquerque Filho²

RESUMO

As novas demandas de tráfego e clima exigem que materiais asfálticos atinjam níveis superiores de desempenho, e a vastidão da indústria no desenvolvimento de ligantes faz com que a caracterização reológica gradativamente substitua testes empíricos. Como as misturas asfálticas herdaram as propriedades do ligante, uma seleção precisa promove projetos mais econômicos em termos técnicos e ambientais. Assim, este trabalho propôs uma classificação híbrida de ligantes asfálticos, considerando simultaneamente deformação permanente e fadiga, com base em um banco de dados do Grupo de Estudos em Pavimentação e Segurança Viária da Universidade Federal de Santa Maria (GEPPASV/UFSM). Os materiais foram caracterizados na condição virgem, envelhecidos à curto prazo e envelhecidos à longo prazo, e os testes envolvem caracterização convencional e reológica (no domínio viscoelástico linear e de dano). Os indicadores para definição das classes foram selecionados com base na correlação com parâmetros de misturas asfálticas (*Flow Number* para deformação permanente e Fator de Fadiga da Mistura para a fadiga, do ensaio uniaxial cíclico à tração direta). Nesse sentido, foram estipuladas 25 classes híbridas para os ligantes, com base na compliância não recuperável a 64°C do ensaio *Multiple Stress Creep Recovery* ($J_{nr,3,2}$ 64°C) e no Fator de Fadiga do Ligante pelo critério de falha da máxima energia de pseudo-deformação acumulada (FFL_{19°C} máxPSE). Os limites partiram da normativa AASHTO M 332 para o J_{nr} e de Possebon (2021) para o FFL. Assim, a classificação orienta a seleção dos ligantes com base em critérios de projeto e indicadores de desempenho, permitindo identificar ligantes excelentes para os dois defeitos, intermediários, excelentes para apenas um defeito e de baixo desempenho, promovendo economia de recursos e projetos mais assertivos.

PALAVRAS-CHAVE: Ligantes asfálticos; Seleção de ligantes; Desempenho; Deformação Permanente; Fadiga.

ABSTRACT

The new demands of traffic and climate require asphalt materials to achieve higher performance levels, and the vastness of the industry in developing binders means that rheological characterization is gradually replacing empirical tests. As asphalt mixtures inherit the properties of the binder, accurate selection promotes more economical projects in technical and environmental terms. This study therefore proposed a hybrid classification of asphalt binders, considering both permanent deformation and fatigue, based on a database was created by the Paving and Road Safety Study Group at the Federal University of Santa Maria (GEPPASV/UFSM). The materials were characterized in virgin condition, short-term aged and long-term aged conditions, and tests involved conventional characterization and rheological characterization (in linear viscoelastic and damage domain). The indicators used to define the classes were selected based on their correlation with asphalt mix parameters (*Flow Number* for permanent deformation and *Fatigue Factor of Mixture* for fatigue, from uniaxial cyclic direct tensile test). To this end, 25 hybrid classes were stipulated for the binders, based on non-recoverable compliance at 64°C from the *Multiple Stress Creep Recovery* test ($J_{nr,3,2}$ 64°C) and the *Fatigue Factor of Binder* using the maximum accumulated pseudo-deformation energy failure criterion (FFL_{19°C} maxPSE). The limits were based on AASHTO M 332 standard for J_{nr} and Possebon (2021) for FFL. Thus, the classification guides the selection of binders based on design criteria and performance indicators, making it possible to identify excellent binders for both defects, intermediate binders, excellent binders for only one defect and low performance binders, promoting resource savings and more assertive designs.

KEY WORDS: Asphalt binders; Binder selection; Performance; Permanent deformation; Fatigue.

¹ Universidade Federal de Santa Maria, victorianunesramos@gmail.com; luspecht@ufsm.br; silviolschuster@ufsm.br.

² Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, luiz.mello@dnit.gov.br; luiz.albuquerque@dnit.gov.br.



INTRODUÇÃO

A busca por pavimentos flexíveis mais duráveis visa promover aos seus usuários viagens seguras, confortáveis e econômicas, tanto em termos de manutenção veicular quanto em consumo de combustível (BERNUCCI *et al.*, 2022). Uma vez que as misturas asfálticas utilizadas no revestimento herdam as propriedades dos ligantes, a escolha desse material passa a ter influência significativa no desempenho do pavimento (PIRES *et al.*, 2022; POSSEBON *et al.*, 2021).

As variações climáticas e de tráfego tornam a seleção de ligantes asfálticos uma decisão econômica, visto que a alocação de recursos nesse material deve se adequar às condições de projeto, e porque a durabilidade da estrutura determina os períodos de conservação, manutenção e reconstrução (HASS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994; YODER; WITCZAK, 1975). Além disso, torna-se uma decisão também ambiental, já que pavimentos com menor irregularidade reduzem o consumo de combustíveis e a emissão de gases do efeito estufa (AZEVEDO; JUNIOR; ARANTES, 2021).

Os protocolos de caracterização de ligantes asfálticos evoluíram ao longo dos anos com o nível de conhecimento de engenheiros e pesquisadores, e com o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas (SPEIGHT, 2015). Nesse sentido, é válido destacar que a seleção assertiva de ligantes, com base em propriedades de desempenho, aumenta a probabilidade de sucesso do pavimento como um todo, e diminui a influência de medidas empíricas nas tomadas de decisão, que possuem pouca correlação com o desempenho de campo (ANDERSON; CHRISTENSEN; BAHIA, 1991).

A especificação Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*), desenvolvida nos Estados Unidos como parte do *Strategic Highway Research Program* (SHRP) na década de 1990 (HARRIGAN; LEAHY; YOUTCHEFF, 1994), apresentou-se como um grande avanço na caracterização de ligantes, por submeter os materiais a condições mais próximas da realidade e captar seu comportamento viscoelástico. A especificação baseia-se em temperaturas críticas para trincamento térmico, fadiga e deformação permanente, a partir de dados viscoelástico lineares, além de incluir um indicador de dano por deformação permanente a partir do ensaio *Multiple Stress Creep Recovery* (compliance não recuperável – J_{nr}). No entanto, encontra-se em constante avanço, e carece de métodos para investigação da fadiga e do envelhecimento. O método de teste *Linear Amplitude Sweep* para a fadiga tem se mostrado promissor, e em conjunto com a mecânica do dano contínuo é capaz de obter indicadores robustos para esse fenômeno, como o Fator de Fadiga do Ligante.

No Brasil, apesar de diversos pesquisadores estarem voltados ao estudo reológico de ligantes asfálticos, a incorporação de medidas de desempenho em especificações é desafiadora, tendo em vista o custo elevado de equipamentos como o reômetro de cisalhamento dinâmico, e a necessidade de maior capacitação técnica para realização e interpretação dos testes. No entanto, diversas empresas como a Petrobras, concessionárias e distribuidoras, além de universidades e o Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (IPR/DNIT), já possuem infraestrutura para caracterização reológica de ligantes, tornando mais factível a adoção de propostas de classificação ou especificações por desempenho desses materiais (LEITE; MOTTA, 2019).

Além disso, é válido destacar que a deformação permanente e a fadiga são as duas principais manifestações patológicas das rodovias (PAPAGIANNAKIS; MASAD, 2008), e ocorrem simultaneamente em campo. Apesar de haver a possibilidade de que um defeito seja mais predominante na rodovia, nenhum deles pode ser negligenciado, e não existem propostas formais para classificação híbrida de ligantes para sua seleção. Assim, este trabalho propõe a classificação de ligantes asfálticos considerando, ao mesmo tempo, um indicador de deformação permanente e outro de fadiga, com o objetivo de orientar a seleção desses materiais de maneira mais racional de acordo com critérios específicos de projeto.



DOI: 10.29327/1430212.49-20

SELEÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR DESEMPENHO
CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA

MATERIAIS E MÉTODOS

Planejamento da Pesquisa

A Figura 1 apresenta o planejamento da pesquisa, iniciando pela estruturação de um banco de dados, envelhecimento de ligantes asfálticos, caracterização desses materiais, correlação com indicadores de misturas e, por fim, o estabelecimento das classes híbridas de ligantes.

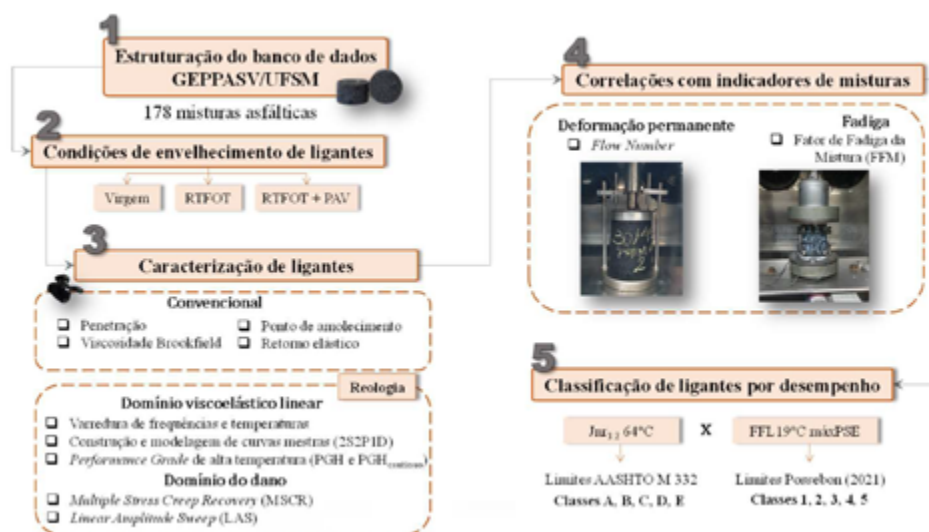


Figura 1. Planejamento da pesquisa (AUTORES, 2024)

Materiais utilizados

Esta pesquisa teve início com a estruturação de um banco de dados de misturas asfálticas a quente do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária, da Universidade Federal de Santa Maria (GEPPASV/UFSM, no Rio Grande do Sul, Brasil). Nesse momento, existem 178 misturas asfálticas catalogadas, com características distintas de agregados, ligantes asfálticos, dosagem, rigidez e danificação por deformação permanente e fadiga. O banco de dados abrange ligantes convencionais (10/20, 30/45 e 50/70), modificados por polímero (55/75, 60/85, 65/90 e HiMA) e por borracha (AMB 08), ligantes TLA e TLA Flex, e extraídos de misturas recicladas.

Caracterização convencional de ligantes asfálticos

A caracterização convencional consistiu em testes das especificações tradicionais. O ensaio de penetração foi conduzido à 25°C, pela cravação de uma agulha padronizada de 100 gramas durante 5 segundos na amostra de ligante, e o resultado obtido em décimos de milímetros (DNIT 155/2010 - ME). Por outro lado, a viscosidade foi obtida em um viscosímetro rotacional Brookfield, pela rotação de um *spindle* padronizado, nas temperaturas de 135, 150 e 177°C, de acordo com ABNT NBR 15184 (2021). O ponto de amolecimento consistiu na temperatura máxima verificada para que amostras de ligante suportassem uma esfera padronizada (DNIT 131/2010 - ME). Por fim, o retorno elástico dos materiais foi verificado no ductilômetro, pela recuperação apresentada pela amostra a 25°C após o estiramento de 20 cm (velocidade de 5 cm por minuto) e repouso de 1 hora (DNIT 130/2010 - ME).



Caracterização linear viscoelástica de ligantes asfálticos (LVE)

A reologia de ligantes (domínio LVE e de dano) foi estudada nas condições virgem, após envelhecimento de curto prazo no *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) (AASHTO T 240, 2023) e após envelhecimento de longo prazo no *Pressure Aging Vessel* (PAV) (AASHTO R 28, 2022). Os ligantes asfálticos foram submetidos a testes de varredura de frequências e temperaturas sem imposição de dano (baixas deformações) (AASHTO T 315, 2022), para obtenção de indicadores de rigidez e viscoelasticidade (módulo de cisalhamento dinâmico $|G^*|$ e ângulo de fase ϕ). As amostras foram testadas em um reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer* – DSR), modelo Anton Paar EC Twist MCR 502, em temperaturas de 5°C a 65°C e 25 valores de frequência. O Princípio de Superposição Tempo-Temperatura (PSTT) foi utilizado para construção de curvas mestras. Os valores de $|G^*|$ e ϕ também são utilizados como parâmetros de controle pela especificação Superpave, para determinar o Grau de Performance em alta temperatura (*Performance Grade* – PGH), definido como a maior temperatura em que $|G^*|/\text{sen}\phi$ é superior a 1,0 kPa na condição virgem e 2,2 kPa após RTFOT (AASHTO M 320, 2023), com classes que variam de 6 em 6°C.

Caracterização do dano em ligantes asfálticos

Os parâmetros de danificação por deformação permanente (DP) e fadiga foram obtidos fora do domínio LVE, também no DSR. Quanto à deformação permanente, os ligantes foram testados segundo o protocolo *Multiple Stress Creep Recovery* (AASHTO T 350, 2023) após RTFOT, com tensões de 0,1 kPa e 3,2 kPa, utilizando a geometria de 25 mm e um *gap* de 1 mm. O teste permite calcular a compliância não recuperável (J_{nr}), sendo que valores mais baixos estão relacionados a um maior desempenho ao afundamento em campo (PIRES *et al.*, 2022). O valor total de J_{nr} em cada tensão é a média aritmética da compliância não recuperável calculada a cada 10 ciclos (1 s de tensão e 9 s de repouso). Ao final de 10 ciclos, o J_{nr} é calculado pela Equação 1. O percentual de recuperação (R%) é calculado de maneira similar, e representa a parcela recuperável da deformação em relação à tensão aplicada. Por fim, os valores de J_{nr} em 3,2 kPa são utilizados para classificação de ligantes quanto ao tráfego conforme a Tabela 1 (AASHTO M 332, 2023). Os ligantes foram classificados a 64°C, por ser o PGH necessário para a maior parte do Brasil (FACCIN *et al.*, 2021).

$$J_{nr}(\tau, N) = \frac{\varepsilon_{10}}{\tau} \quad (1)$$

Onde N varia a cada 10 ciclos, τ é a tensão aplicada e ε_{10} é o valor da deformação ajustada no final da recuperação.

Tabela 1. Classificação de tráfego para ligantes asfálticos (AASHTO M 332, 2023)

Limites J_{nr} (kPa ⁻¹)	Classificação MSCR
$J_{nr3,2} \leq 4,5$	S – <i>Standard</i> (tráfego padrão)
$J_{nr3,2} \leq 2,0$	H – <i>Heavy</i> (tráfego pesado)
$J_{nr3,2} \leq 1,0$	V – <i>Very Heavy</i> (tráfego muito pesado)
$J_{nr3,2} \leq 0,5$	E – <i>Extreme</i> (tráfego extremamente pesado)

O comportamento à fadiga dos ligantes foi avaliado pelo teste *Linear Amplitude Sweep* (LAS) (AASHTO T 391, 2020; DNIT 439/2022 - ME), pela aplicação de cargas cíclicas em geometria de 8



DOI: 10.29327/1430212.49-20

SELEÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR DESEMPENHO
CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA

mm e *gap* de 2 mm. As amostras são envelhecidas em RTFOT e RTFOT+PAV. O ensaio ocorre a 19°C, com incremento das amplitudes de deformação em rampa linear de 0,1% a 30% a 10 Hz. O dano foi calculado de acordo com a norma AASHTO T 391 (2020), e definições de falha de redução de 35% na integridade ($35\%|G^*|\sin\phi$), recomendada em AASHTO T 391 (2022) e da máxima energia de pseudo-deformação acumulada (MáxPSE), recomendada em DNIT 439/2022 – ME.

A partir da determinação da falha, a vida de fadiga N_f foi calculada para diferentes níveis de deformação. Assim, conforme proposto por Underwood (2011), o Fator de Fadiga do Ligante (FFL) foi calculado com base na área abaixo das curvas de vida de fadiga entre as deformação de 1,25% e 2,50% (Equação 2). Nesse sentido, a literatura indica que o parâmetro possui boa correlação com o desempenho de misturas asfálticas e com a área trincada de pavimentos reais (NASCIMENTO, 2015; OSMARI *et al.*, 2019), e a Tabela 2 indica limites para classificação de ligantes pelo FFL.

$$FFL = \frac{\log N_{f_{1.25\%}} + \log N_{f_{2.50\%}}}{2} * (\log 0.025 - \log 0.0125) \quad (2)$$

Onde $N_{f_{1.25\%}}$ e $N_{f_{2.50\%}}$ são os ciclos até a falha nas deformações de 1,25% e 2,50%, respectivamente.

Tabela 2. Classificação de ligantes pelo $FFL_{19^\circ C}$ (POSSEBON, 2021).

Classes	$FFL_{19^\circ C}$
1 - Pobre	$FFL < 1,22$
2 – Inferior	$1,22 < FFL < 1,31$
3 - Mediano	$1,31 < FFL < 1,48$
4 - Superior	$1,48 < FFL < 1,57$
5 - Excelente	$FFL > 1,57$

Parâmetros-alvo de dano em misturas asfálticas

Para definir os indicadores usados na criação das classes, foram testadas as correlações e com propriedades de misturas asfálticas. Para a deformação permanente, o indicador *Flow Number* (FN) foi selecionado por haver grande quantidade de dados no GEPPASV e por ser considerado um bom parâmetro para prever o afundamento em trilha de roda (ATR) nas rodovias, especialmente para ligantes convencionais 50/70 e modificados por polímero (FACCIN, 2018; PIRES *et al.*, 2022). O ensaio ocorre a 60°C, com carga cíclica de 0,1 s de carregamento e 0,9 s de repouso e intensidade de 204 kPa. O *Flow Number* corresponde à passagem da fase secundária para a fase terciária do acúmulo de deformações (AASHTO T 378, 2022).

Em relação à fadiga, o Fator de Fadiga da Mistura (FFM) foi selecionado, proveniente da interpretação do ensaio uniaxial de fadiga à tração direta pela teoria viscoelástica do dano contínuo simplificada (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage* – SVECD). O teste traciona amostras a 19°C e 10 Hz, com deformações de 150 a 350 $\mu\text{m}/\text{m}$, a depender do tipo de ligante contido na mistura (AASHTO T 400, 2023). O FFM consiste na área abaixo da curva de Wöhler simulada pelo S-VECD (equação de Nascimento, 2016) entre as deformações de 100 e 200 μm . Nesse sentido, diversas pesquisas apontam o FFM como bom indicador de fadiga em misturas asfálticas (ALMEIDA JR., 2022; BOEIRA, 2018; POSSEBON, 2021; SCHUSTER, 2018; VESTENA, 2021).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Definição do indicador de deformação permanente

Considerando o *Flow Number* como indicador-alvo, as correlações testadas partiram dos indicadores de ligantes com coeficientes lineares de Pearson (r) mais altos e estatisticamente diferentes de zero (a um nível de confiança de 95%), para fornecer um indicativo da força da correlação entre as variáveis. Neste trabalho estão apresentados apenas parâmetros reológicos com maiores coeficientes de determinação (R^2), e detalhes sobre correlações de Pearson e outros testes podem ser encontrados em Nunes-Ramos (2023). As correlações aqui apresentadas não incluem ligantes extraídos de misturas recicladas (*Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP) e rejuvenescidos.

A Figura 2 mostra as correlações de FN com $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ e $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$. A Figura 2a e Figura 2b indicam que a rigidez dos ligantes em alta temperatura não aponta tendência clara para evolução do FN. As tendências melhoram quando os tipos de ligantes são separados, mas ainda são insatisfatórias, com exceção do CAP TLA. Contudo, tratam-se de apenas 5 pontos, e 4 deles são de misturas com o mesmo ligante. O ângulo de fase em alta temperatura (Figura 2c e Figura 2d) foi mais adequado para inferir sobre a deformação permanente, mas ainda insatisfatório. Ainda assim, é possível observar tendências em asfaltos com polímero, visto que um maior comportamento viscoso (maior ϕ) em altas temperaturas tende a prejudicar o desempenho à deformação permanente da mistura final.

A Figura 3 indica que a compliância não recuperável ($J_{nr,3,2}$ do MSCR) medida no PGH apresenta melhores correlações com o FN, seguindo as recomendações do Superpave, o qual entende que os materiais serão selecionados de acordo com a temperatura crítica da rodovia. Para o $J_{nr,3,2}$ 64°C , as correlações ficaram prejudicadas especialmente quando os tipos de ligantes são separados, mas ainda assim apontam uma tendência de queda do FN conforme o J_{nr} cresce, ou seja, com maiores deformações irreversíveis no ensaio. Destaca-se que, apesar das correlações não serem excelentes, a utilização de um parâmetro de dano é mais adequada para seleção dos materiais asfálticos, uma vez que o objetivo não é a previsão de desempenho.

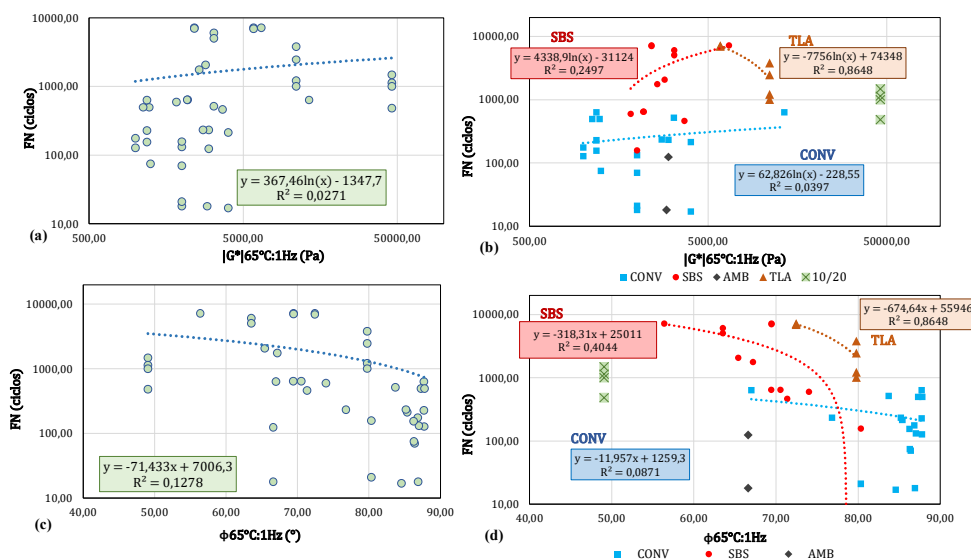


Figura 2. Correlações com o FN: PGH_{contínuo} RT (a) geral e (b) por tipo de CAP; $|G^*|_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ (c) geral e (d) por tipo de CAP; $\phi_{65^\circ\text{C}:1\text{Hz}}$ (e) geral e (f) por tipo de CAP (AUTORES, 2024)



DOI: 10.29327/1430212.49-20

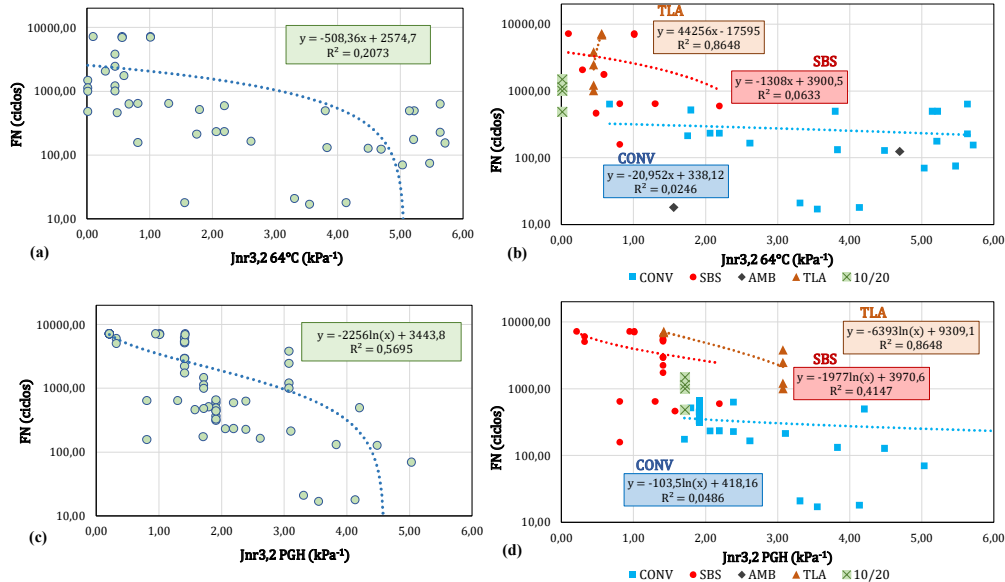
SELEÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR DESEMPENHO
CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA

Figura 3. Correlações com o FN: J_{nr3,2} 64°C (a) geral e (b) por tipo de CAP; J_{nr3,2} PGH (c) geral e (d) por tipo de CAP (AUTORES, 2024)

Definição do indicador de fadiga

Com relação à fadiga, a Figura 4 mostra que o ciclo de falha do ensaio de LAS (Nf) é um indicador promissor para seleção de materiais, tanto para o critério de perda de 35% da integridade ($|G^*|sen\phi$) quanto da máxima energia de pseudodeformação acumulada (máxPSE). Essa correlação parece ser mais assertiva para ligantes convencionais (Figura 4b), visto que ligantes com polímero não apresentaram tendências claras. Em geral, maiores valores de Nf tendem a promover misturas com maior FFM, indicando que o ligante desempenha papel relevante na fadiga das misturas.

No caso do Fator de Fadiga do Ligante (FFL da Figura 5), as correlações gerais foram regulares, indicando que ligantes com maior FFL formam misturas com maior desempenho à fadiga. Novamente as tendências foram mais claras para ligantes sem modificação, embora os coeficientes de determinação para asfaltos com polímero tenham melhorado com relação ao Nf. Nesse sentido, o FFL é obtido após a interpretação do ensaio pelo S-VECD, e seu cálculo se baseia em ciclos de falha simulados para um ensaio perfeito. Assim, considera-se um indicador mais adequado para seleção de ligantes asfálticos. Considerando essas tendências, o critério da norma AASHTO T 400 (2022) ($35\%|G^*|sen\phi$) parece mais adequado na correlação com FFM, mas destaca-se que há mais dados pelo critério máxPSE, que acaba sendo afetado pela variabilidade dos valores.

Classificação geral de ligantes asfálticos

A evolução das manifestações patológicas em rodovias ocorre de maneira simultânea. Nesse sentido, foram plotados em um mesmo gráfico os valores de FFL_{19°C} máxPSE e J_{nr3,2} 64°C (Figura 6). O FFL nesse critério foi escolhido por ser amplamente estudado no meio acadêmico, possui classes definidas em estudos anteriores (POSSEBON, 2021) e é um critério mais fundamentalista (mais detalhes em Wang *et al.*, 2015), permitindo a separação mais precisa de ligantes modificados e não modificados.



VICTÓRIA NUNES RAMOS,
LUCIANO PIVOTO SPECHT, SILVIO LISBOA SCHUSTER,
LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO, LUIZ HELENO ALBUQUERQUE FILHO

Destaca-se ainda que esse critério foi adotado pela norma brasileira para o ensaio de LAS (DNIT 439/2022 - ME).

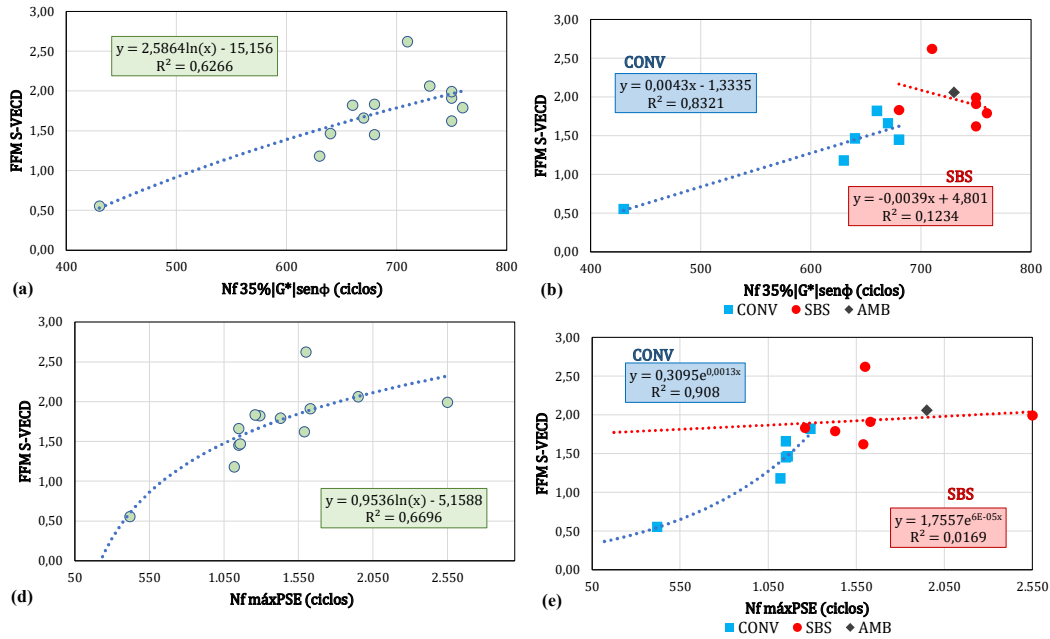


Figura 4. Correlação com FFM S-VECD: Nf 35%|G*|senφ (a) geral e (b) por tipo de ligante; e Nf máxPSE (a) geral e (b) por tipo de ligante (AUTORES, 2024)

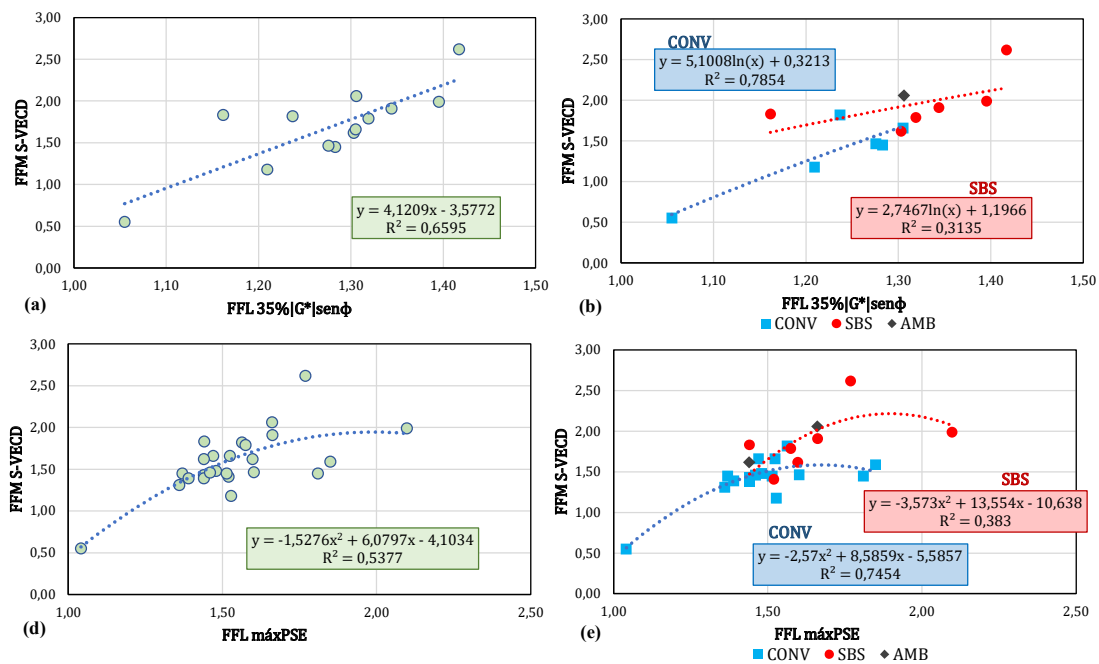


Figura 5. Correlação com FFM S-VECD: FFL 35%|G*|senφ (a) geral e (b) por tipo de ligante; e FFL máxPSE (a) geral e (b) por tipo de ligante (AUTORES, 2024)



DOI: 10.29327/1430212.49-20

SELEÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR DESEMPENHO
CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA

Além disso, o J_{nr} a 64°C foi escolhido pois essa é apenas uma recomendação preliminar para seleção de materiais, e não uma garantia de desempenho. Essa temperatura também constitui o PGH necessário para a maior parte do país (FACCIN et al., 2021). Destaca-se ainda que ligantes classificados em uma temperatura seguirão a mesma ordem de ranqueamento quando caracterizados em temperaturas distintas, ou seja, o ligante de maior desempenho a 64°C seguirá sendo o de maior desempenho a 70°C , por exemplo. Os limites de J_{nr} da Figura 6 seguiram a recomendação da AASHTO M 332 (2022).

A partir da figura, observa-se que há uma tendência de que ligantes com polímero SBS sejam os mais eficazes no enfrentamento dos dois defeitos (canto superior esquerdo), mas que apenas o tipo de ligante não é suficiente para selecionar o material a ser utilizado nos projetos. De maneira análoga, embora a maior parte dos ligantes convencionais permaneçam à direita do gráfico (maiores J_{nr}) e possuam valores intermediários de FFL, há exceções que podem ser utilizadas em detrimento de ligantes com polímero, possivelmente como uma opção menos custosa, o que destaca a necessidade de execução de ensaios de desempenho para seleção de materiais asfálticos.

Os ligantes TLA, devido a elevada rigidez, são excelentes para a deformação permanente, mas nem sempre são excelentes para a fadiga, justificando seu uso, por exemplo, para rodovias com temperatura do ar elevada e/ou tráfegos muito pesados e lentos. O CAP 10/20, apesar de também possuir rigidez elevada, forneceu resultados satisfatórios para os dois defeitos considerando os ensaios de LAS e MSCR.

Com base nas observações anteriores, a Figura 7 ilustra o ábaco proposto para a seleção de ligantes asfálticos por desempenho, considerando deformação permanente e fadiga simultaneamente. A nomenclatura seguiu sequência numérica para o FFL e alfabética para J_{nr} . Portanto, as classes de fadiga variam de 1 a 5, sendo 1 a classe de maior desempenho (maior FFL) e de deformação permanente de A até E, sendo A a classe de maior desempenho (menor J_{nr}). A combinação dessas classes permite entender previamente o comportamento do ligante frente aos dois defeitos, ou seja, um ligante da classe 1A é o ligante mais adequado para a fadiga e para deformação permanente, e um ligante da classe 5E, o ligante de menor desempenho.

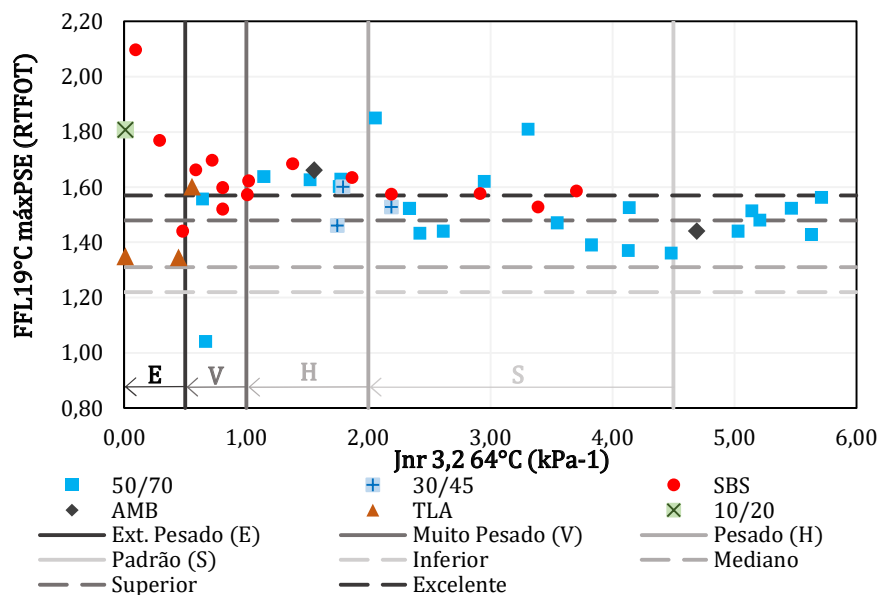


Figura 6. FFL $_{19^{\circ}\text{C}}$ máxPSE (RTFOT) vs. J_{nr} 3,2 64°C (AUTORES, 2024)



VICTÓRIA NUNES RAMOS,
LUCIANO PIVOTO SPECHT, SILVIO LISBOA SCHUSTER,
LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO, LUIZ HELENO ALBUQUERQUE FILHO

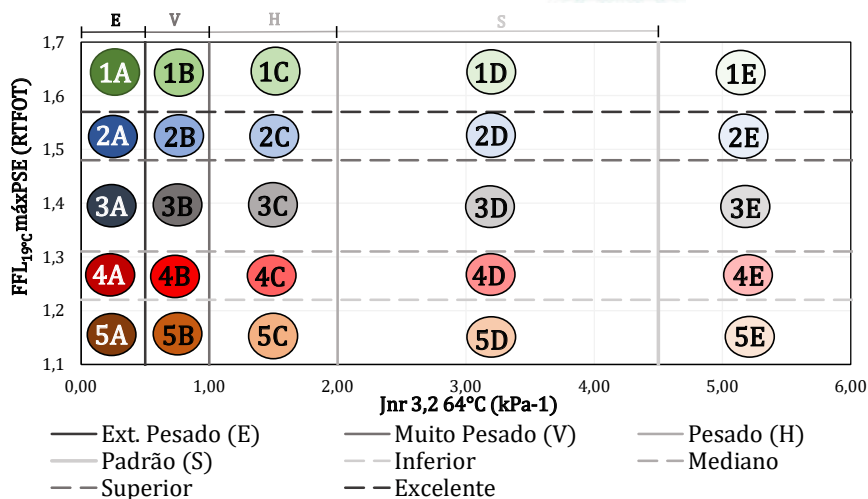


Figura 7. Classes de ligantes asfálticos por deformação permanente e fadiga (AUTORES, 2024)

A partir do ábaco, considerando premissas de projeto e condições da rodovia, o ligante asfáltico pode ser escolhido de maneira técnica e econômica. A título de exemplo, no caso de rodovias onde a fadiga possui maior probabilidade de ocorrência (temperaturas intermediárias e tráfego rápido), o ligante da classe 1D pode ser selecionado. Por outro lado, em rodovias onde a deformação permanente é o principal defeito, poderia ser utilizado um ligante 5A. A escolha, evidentemente, deverá partir de estudos de viabilidade econômica e ensaios conclusivos em misturas asfálticas. Por fim, destaca-se que a AASHTO M 332 (2022) indica um J_{nr} máximo de $4,5 \text{ kPa}^{-1}$, mas ligantes com PGH 58 podem superar o limite a 64°C . Nesses casos, para rodovias com PGH necessário mais baixo, recomenda-se que esse ligante seja caracterizado no seu PGH, antes de descartar o seu uso.

CONCLUSÕES

Este trabalho propôs uma classificação de ligantes asfálticos considerando deformação permanente e fadiga simultaneamente, para orientar a seleção desses materiais de maneira racional. Foi estruturado o banco de dados do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária da Universidade Federal de Santa Maria (GEPPASV/UFSM). A seleção dos indicadores de ligantes teve como base as correlações com parâmetros-alvo de misturas asfálticas. Para a deformação permanente, foi escolhido o parâmetro *Flow Number* do ensaio uniaxial cíclico de cargas repetidas, e para a fadiga, o Fator de Fadiga da Mistura (FFM) a partir das curvas de Wöhler simuladas pela equação de Nascimento (2016) e do ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração direta. Verificou-se que o J_{nr} do ensaio de MSCR e o Fator de Fadiga do Ligante do ensaio de LAS eram os mais adequados para selecionar ligantes asfálticos por desempenho.

A plotagem dos dados em um gráfico conjunto de fadiga e deformação permanente permitiu observar que existem ligantes excelentes para os dois defeitos, ligantes intermediários, e ligantes excelentes para apenas um defeito. Nesse cenário, fica evidente que a consideração conjunta da deformação permanente e da fadiga na escolha dos ligantes é a maneira mais assertiva de iniciar um projeto de mistura asfáltica, desde que essa escolha seja fundamentada em ensaios de desempenho. Além disso, observou-se que apenas o tipo de ligante não é suficiente na seleção de materiais. Apesar de ligantes sem modificação apresentarem desempenho inferior, existem exceções que podem ser utilizadas em detrimento de ligantes modificados, o que torna a escolha mais econômica, mas justifica a realização



DOI: [10.29327/1430212.49-20](https://doi.org/10.29327/1430212.49-20)

SELEÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR DESEMPENHO CONSIDERANDO DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA

de testes mais robustos de caracterização. As 25 classes propostas neste estudo não possuem objetivo de garantir o desempenho exato dos ligantes, mas orientam a seleção de materiais conforme as condições reais previstas para a rodovia. Por fim, a variedade de ligantes asfálticos contida no banco de dados evidencia que a indústria é vasta na produção desses materiais, e que a reologia vem se tornando cada vez mais indispensável na caracterização e seleção de ligantes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (IPR/DNIT), pelo Termo de Execução Descentralizada nº 545/2022-00 e à ANP/Petrobras, pelo apoio financeiro à pesquisa, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO M 320. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, D.C.: 2023
- AASHTO M 332. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. Washington, D. C.: 2023
- AASHTO R 28. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). Washington, D. C.: 2022.
- AASHTO T 240. Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test). Washington, DC: 2023
- AASHTO T 315. Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Washington, D. C.: 2022
- AASHTO T 350. Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Washington, D. C.: 2023
- AASHTO T 378. Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). Washington, D. C.: 2022
- AASHTO T 391. Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. Washington, D. C.: 2020
- AASHTO T 400. Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test. Washington, D. C.: 2023
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15184. Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro/RJ: 2021.
- ALMEIDA JR., P. O. B. De. Reciclagem de misturas 100%RAP: investigação de parâmetros para avaliação e dosagem de agentes rejuvenescedores com foco na fadiga. 2022. PhD Thesis. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2022.
- ANDERSON, D. A; CHRISTENSEN, D. W; BAHIA, H. Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 60, p. 437–475, 1991.
- AZEVEDO, P. O.; JUNIOR, E. F. N.; ARANTES, A. E.. Effects of international roughness index on vehicle emissions. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, v. 15, n. 1, p. 41–59, 2021.
- BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.



- BOEIRA, F. D. Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados. 2018. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 130/2010 - ME. Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro – Método de Ensaio. . Rio de Janeiro/RJ: 2010
- DNIT 155/2010 - ME. Material asfáltico – Determinação da penetração. Rio de Janeiro/RJ: 2010
- DNIT 131/2010 - ME. Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ: 2010
- DNIT 439/2022 - ME. Pavimentação – Ligante asfáltico – Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep) – Método de ensaio. Rio de Janeiro/ RJ: 2022
- FACCIN, C. Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande Do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2018.
- FACCIN, C. et al. Mapas de Grau de Desempenho (PG) de ligantes asfálticos para o Brasil. 2021, 100% Digital: 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2021. p. 933–943.
- HARRIGAN, E.; LEAHY, R.; YOUTCHEFF, J. Superpave manual of specifications, test methods and practices. SHRP-A-379. Strategic Highway Research Program, 1994
- HASS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. M. Modern pavement management. Malabar (EUA): Krieger Publishing Company, 1994.
- LEITE, L. F. M.; MOTTA, L. M. G. Evolução das especificações europeias de ligantes asfálticos baseadas em desempenho. Balneário Camboriú, SC: 2019. p. 1766–1777.
- NASCIMENTO, L. A. H. Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. 304 f. PhD dissertation. North Carolina State University, 2015.
- NASCIMENTO, L. A. H. do. Caracterização Avançada de Materiais Asfálticos: Dano por Fadiga. 2016, Curso. Universidade Federal de Santa Maria. 30 e 31 de março de 2016.
- NUNES-RAMOS, V. Proposta para seleção de ligantes e misturas asfálticas considerando deformação permanente e fadiga. 1–398 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2023.
- OSMARI, P. H. et al. Cracking resistance evaluation of asphalt binders subjected to different laboratory and field aging conditions. Road Materials and Pavement Design, v. 20, n. sup2, p. S663–S677, jul. 2019.
- PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. Pavement design and materials. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- PIRES, D. M. et al. Study of the permanent deformation of asphalt mixtures in the field: A multiscale approach. Construction and Building Materials, v. 325, n. January, p. 126763, 2022.
- POSSEBON, É. P. Advanced characterization of brazilian bitumens and mixtures. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2021.
- POSSEBON, É. P. et al. Rheological properties , 2S2P1D modelling and SHStS transformation of 12 Brazilian bitumens and mixtures. Road Materials and Pavement Design, v. 23, n. sup1, p. 68–85, 2021.
- SCHUSTER, S. L. Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.
- SPEIGHT, J. G. Asphalt Materials Science and Technology. Elsevier, 2015.
- UNDERWOOD, B. S. Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete. PhD dissertation. Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, 2011.
- VESTENA, P. M. Segmentos experimentais na BR 116/RS empregando TLAflex, Hima e 55/75-E (SBS): caracterização avançada e monitoramento. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2021.
- YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. Principles of pavement design. New York (EUA): John Wiley e Sons, Inc., 1975.



APLICAÇÃO DE UM MÉTODO OTIMIZADO DE CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES A PARTIR DE SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS

Bruno Cavalcante Mota¹; Mariluce de Oliveira Ubaldo²; Francisco Thiago Sacramento Aragão³ & Luis Alberto Herrmann do Nascimento⁴

RESUMO

O Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico MeDiNa é um importante avanço na área da pavimentação no Brasil, projetado de forma a dar protagonismo às características dos materiais adotados em campo nas obras. Para a identificação destas características, é necessária a realização de ensaios cíclicos, como o de deformação permanente. Atualmente, este ensaio é realizado com a aplicação de 150.000 ciclos e nove pares de tensões. Contudo, acredita-se que este programa experimental pode ser otimizado. Neste sentido, este trabalho adota o Método DP S, que foi desenvolvido recentemente para a avaliação da deformação permanente por meio da construção de curvas mestras. Análises foram realizadas para identificar o impacto da adoção desse método na análise mecânica de estruturas de pavimentos quanto ao afundamento de trilha de roda. Para isso, foram avaliados seis materiais com diferentes características. Foram construídas as curvas mestras e realizados dimensionamentos considerando os coeficientes do modelo adotado no MeDiNa. Resultados de simulações estruturais baseadas no DP S e no método atualmente normatizado não foram significativamente diferentes. Por fim, destaca-se que o método DP S mantém a acurácia na previsão dos afundamentos e possibilita uma redução no tempo de ensaio de até 70%.

PALAVRAS-CHAVE: curva mestra; MeDiNa; *shakedown*; otimização.

ABSTRACT

The Mechanistic-Empirical Design Method MeDiNa is an important advancement in the field of paving in Brazil, designed to give prominence to the characteristics of the materials used in the field. To identify these characteristics, it is necessary to carry out cyclic tests, such as that performed to assess the permanent deformation resistance of the materials. This test is currently carried out using 150,000 cycles and nine pairs of stresses. However, it is believed that this experimental program can be optimized. This work adopts the newly developed DP S Method, which was designed to evaluate permanent deformation based on the construction of master curves. The impact of adopting this method in the mechanistic analysis of pavement structures in terms of rutting was evaluated. To this end, six materials with different characteristics were evaluated. Master curves were constructed and pavement designs were carried out considering the coefficients of the model adopted in MeDiNa. The results of structural simulations based on DP S and on the currently standardized method were not significantly different. Finally, it should be noted that the DP S method maintains accuracy in predicting rutting and enables a reduction in test time of up to 70%.

KEY WORDS: master curve; MeDiNa; *shakedown*; optimization.

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, e-mail: bruno.mota@coc.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, e-mail: mariluce@coc.ufrj.br

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro, e-mail: fthiago@coc.ufrj.br

⁴ CENPES/PETROBRAS, e-mail: luisnascimento@petrobras.com.br



INTRODUÇÃO

O dimensionamento de pavimentos no Brasil, por muito tempo, foi realizado pelo método empírico do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Esse método foi desenvolvido na década de 1960 pelo engenheiro Murilo Lopes de Souza. É baseado no ensaio *California Bearing Ratio* (CBR), em que uma carga de 80 kN é considerada como o eixo-padrão e é adotado um coeficiente de equivalência obtido em pistas da AASHTO. A espessura é determinada para atender ao número de repetições do eixo-padrão, conhecido como o Número N (BALBO, 2007; MEDINA E MOTTA, 2015).

Para a elaboração deste método, foram considerados materiais com solos de fundação com propriedades americanas, não sendo bem representados pelos solos tropicais brasileiros. Ainda, ele estima apenas a utilização de mistura asfáltica tradicional no revestimento, sem considerar as novas tecnologias utilizadas para pavimentos flexíveis. Esse método também não prevê o surgimento de defeitos como o Afundamento de Trilha de Roda (ATR) e o trincamento por fadiga, decorrentes de fatores como o tráfego, os materiais e o clima (PITANGUI, 2019).

O MeDiNa foi idealizado a partir de pesquisas com o programa intitulado SisPAV, desenvolvido por Franco (2007). Estas pesquisas foram frutos da cooperação da Petrobras com universidades que compuseram a Rede Temática de Asfalto, a partir da qual foi acumulado um grande volume de informações de laboratório e de campo. Um Termo de Execução Descentralizada (TED) celebrado entre a COPPE/UFRJ e o DNIT resultou na proposição do Método MeDiNa.

Para a realização de análises de dimensionamento usando o MeDiNa, é necessária a identificação de características dos materiais obtidas a partir de ensaios em laboratório. Entre estas caracterizações, incluem-se o estudo dos materiais naturais das jazidas e do solo de subleito que serão utilizados para compor as camadas de base, sub-base e reforço do subleito (BARBOSA *et al.*, 2021). Para a análise mecanístico-empírica, são utilizados dados como umidade ótima, massa específica e resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e de Deformação Permanente (DP), padronizados pelas normas DNIT 134 (2018a) e DNIT 179 (2018b), respectivamente.

O modelo de previsão da DP de solos e britas constituintes de pavimentos proposto por Guimarães (2009) integra o Método MeDiNa. Para que um material possa ser utilizado na estrutura de um pavimento, é preciso que sejam determinados seus parâmetros de DP, ou Ψ_i , a partir de uma sequência de ensaios triaxiais de cargas repetidas para variados estados de tensões.

A Norma DNIT 179 (2018b) padroniza nove ensaios com estados de tensões distintos, permanecendo cada estado de tensões constante ao longo do mesmo ensaio, em que são aplicados 150.000 ciclos de carga. Lima (2020) ressaltou a possibilidade de utilização de apenas seis pares de tensão para materiais pouco deformáveis. A frequência de aplicação de cargas pode ser de 1 Hz a 5 Hz, dependendo do tipo de equipamento que esteja sendo empregado.

Este entendimento sobre o comportamento do material é essencial para facilitar a sua seleção e aplicação em camadas de pavimentos. No entanto, o programa experimental é reconhecidamente demorado e pode levar cerca de dez dias úteis para ser concluído para um único material, quando



DOI: [10.29327/1430212.49-29](https://doi.org/10.29327/1430212.49-29)

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO OTIMIZADO DE CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES A PARTIR DE SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS

executado na frequência de 2 Hz. Nesse sentido, o objetivo deste artigo é avaliar a utilização do Método DP S, que analisa a DP a partir da construção de curvas mestras, e o impacto da adoção desse método na análise mecânica de estruturas de pavimentos quanto ao afundamento de trilha de roda.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido à importância do estudo da DP de solos e materiais granulares, diversos modelos foram desenvolvidos e aprimorados para que fosse possível prevê-la, considerando a sua aplicação na composição de camadas de pavimentos. Um dos principais parâmetros na análise do comportamento de um solo quanto à DP é a sequência de tensões à qual o material é submetido. Monismith *et al.* (1975) indicaram um efeito de enrijecimento em uma argila siltosa devido a uma série de aplicações de tensões.

O estado de tensões pode ser expresso pelo histórico, magnitude e configuração das tensões principais aplicadas durante a passagem de veículos sobre os pavimentos. Barksdale (1972) observou que quanto maior a tensão desvio e a razão de tensões, maior será a DP total. Lashine (1971 *apud* Lekarp *et al.*, 2000) indicou que a DP se mostra associada a uma relação entre tensão desvio e confinante (σ_d/σ_c), indicando proporcionalidade entre a deformação e as tensões aplicadas.

Autores como Barksdale (1972), Lekarp e Dawson, (1998), Rezende (1999) e Guimarães (2009) indicaram que a configuração das cargas influencia a DP, que tende a aumentar com a tensão desvio. Lekarp *et al.* (2000) e Guimarães (2009) indicaram uma relação inversamente proporcional entre a DP e a tensão confinante.

Guimarães (2009) desenvolveu um método mecânico-empírico para a previsão da DP em solos tropicais e outros materiais granulares. O autor utilizou variados estados de tensões nos ensaios para uma mesma amostra, sendo essas compatíveis com as observadas em campo.

No Brasil, em geral, modelos matemáticos não têm sido desenvolvidos. Ao invés disso, o que tem ocorrido é a avaliação de novos parâmetros que podem ser incorporados ao modelo de Guimarães (2009). Os modelos mais recentes consideram diversos fatores como índice de vazios, umidade e características físicas do material.

Lima (2020) recomendou a diminuição de nove para seis pares de tensões em materiais pouco deformáveis. Cabral (2021) ensaiou materiais que se acomodaram com menos de 10.000 ciclos, analisando-os pelo modelo de multiestágios. Silva *et al.* (2021) destacaram que foram obtidos valores de deformações plásticas de 90% para 50.000 ciclos em relação à deformação total para os materiais estudados.

Recentemente, Mota *et al.* (2023; 2024) desenvolveram um método otimizado de ensaio e análise da DP de solos e materiais granulares a partir da construção de curvas mestras. O modelo se baseia na observação de equivalência entre os valores de DP para diferentes combinações de par de tensão e número de ciclos de carga. A análise é feita em um espaço reduzido, o que permite a avaliação da DP do material para um determinado par de tensão considerando um espectro de ciclos reduzidos muito mais amplo do que o de ensaio.



MÉTODO DE PESQUISA

O modelo otimizado de DP

Este artigo avalia o impacto da adoção do modelo otimizado de Mota *et al.* (2023; 2024) na resposta mecânica de ATR de estruturas de pavimentos, a partir de análises pelo método mecanístico-empírico MeDiNa. O método é intitulado DP S, devido ao parâmetro S envolvido na sua formulação, que considera a razão de tensões.

O modelo é matematicamente igual ao desenvolvido por Guimarães (2009) e é representado pelas Equações 1 a 3. Essas equações foram obtidas a partir do desmembramento do modelo de Guimarães (2009) para visualizar o impacto da magnitude das tensões e a sua influência nos resultados de DP. Elas são utilizadas para a construção das curvas mestras, a partir dos fatores de translação (FTs). Contudo, a partir das curvas mestras, o modelo DP S permite a visualização da influência dos pares de tensões nos valores de DP e a sua obtenção a partir do princípio da superposição.

$$S = \left(\frac{\sigma_c}{0,04} \right)^{s_1} \times \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_c} \right)^{s_2} \quad (1)$$

onde σ_c é a tensão confinante e σ_d é a tensão desvio (em MPa).

$$DP S = a_1 \times S^{a_2} \times N^{a_3} \quad (2)$$

onde N é a quantidade de ciclos aplicados.

$$N_{red} = N \times FT \quad (3)$$

Os coeficientes s_1 e s_2 do parâmetro S e a_1 , a_2 e a_3 da DP S são calculados por um processo iterativo de minoração do erro quadrático médio (*mean square error*, MSE, em inglês) entre os valores de deformação obtidos no ensaio e pelo modelo, com o solver do Excel.

Para construir uma curva mestra para as propriedades viscoelásticas de materiais asfálticos, é selecionada uma temperatura de referência. De forma análoga, no procedimento descrito por Mota *et al.* (2023; 2024), é definido um par de tensões de referência. Para a proposição do modelo, foi escolhido o par 40/120 (σ_c/σ_d , kPa/kPa), de razão 1/3, porque ele foi aplicado a todos os materiais avaliados.

No processo de deslocamento, as curvas dos pares com razão σ_c/σ_d maior que 1/2 são transladadas para a esquerda e os pares com razão ou tensão confinante menor que 1/2 são transladados para a direita. Isso ocorre porque as razões de pares mais severos (1/3) representam a DP de ciclos mais elevados para um par com menor razão de tensões.

Por fim, com os resultados de DP obtidos a partir das curvas mestras, obtêm-se os coeficientes do modelo de Guimarães (2009) para serem usados como parâmetros de entrada no MeDiNa. Nessa etapa, o solver é novamente executado para que se obtenham os coeficientes do modelo de Guimarães (2009), a partir da redução dos erros quadráticos, com os valores obtidos pelas curvas mestras.



DOI: 10.29327/1430212.49-29

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO OTIMIZADO DE CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS
E MATERIAIS GRANULARES A PARTIR DE SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS

No desenvolvimento do método otimizado de DP, Mota *et al.* (2023; 2024) propuseram os pares de tensões e quantidade de ciclos apresentados na Tabela 1. Os autores destacaram que caso o material não suporte pares de tensões mais severos, como o 120/360, o mais severo anterior a ele deve ser aplicado por 150.000 ciclos. Essa quantidade de ciclos foi definida a partir de uma amostragem de 24 solos e materiais granulares que haviam sido ensaiados anteriormente até 150.000 ciclos. Os dados obtidos foram reanalisados pela metodologia de construção de curvas mestras e foi identificado que apenas 10.000 ciclos eram suficientes para a previsão da DP a partir das curvas construídas. Optou-se pela aplicação de 150.000 ciclos para o par 120/360 para que não fosse necessária fazer a extrapolação da curva mestra depois da sua geração.

Tabela 1. Pares de tensão e número de ciclos do método otimizado DP S (Fonte: MOTA *et al.*, 2024)

Tensão confinante σ_3 (kPa)	Tensão desvio σ_d (kPa)	Número de ciclos
40	40	10.000
80	80	10.000
120	240	10.000
40	120	10.000
80	240	10.000
120	360	150.000

Avaliação mecanístico-empírica do ATR

Para analisar o impacto da modificação do número de ciclos proposta pelo método DP S, foram realizadas simulações de uma estrutura de pavimento no MeDiNa, modificando os materiais da base para os avaliados neste artigo. As simulações ocorreram tanto para o procedimento da norma DNIT 179 (2018b), quanto para o método otimizado de DP S.

A Tabela 2 apresenta os materiais utilizados neste artigo e a Figura 1, a estrutura padrão definida. Para esse estudo, foram selecionados dois materiais com granulometria intermediária, dois materiais com granulometria fina e duas britas. Os materiais do revestimento e do subleito foram selecionados da base de dados do próprio MeDiNa.

Tabela 2. Materiais analisados pelos métodos da DNIT 179 (2018b) e DP S

Id.	Material	Granulometria (%)		MR médio (MPa)	Classificação MCT	h_{ot} (%)	Energia de compactação
		Argila/Silte/ Areia/Pedregulho					
M1	Solo	17/23/55/5		289,00	NG'	17,0	Normal
M2	Solo	12/42/45/1		178,00	NS'	11,9	Intermediária
M3	Solo	56/17/27/0		250,00	LG'	22,5	Intermediária
M4	Solo	54/7/38/1		201,36	NG'	20,7	Normal
M5	Brita	Brita		381,00	-	3,2	Intermediária
M6	Brita	Brita		384,00	-	2,6	Modificada



Revestimento (10 cm): RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba

Base (15 cm): Variando os materiais da Tabela 2

Subleito: Solo siltoso NS'

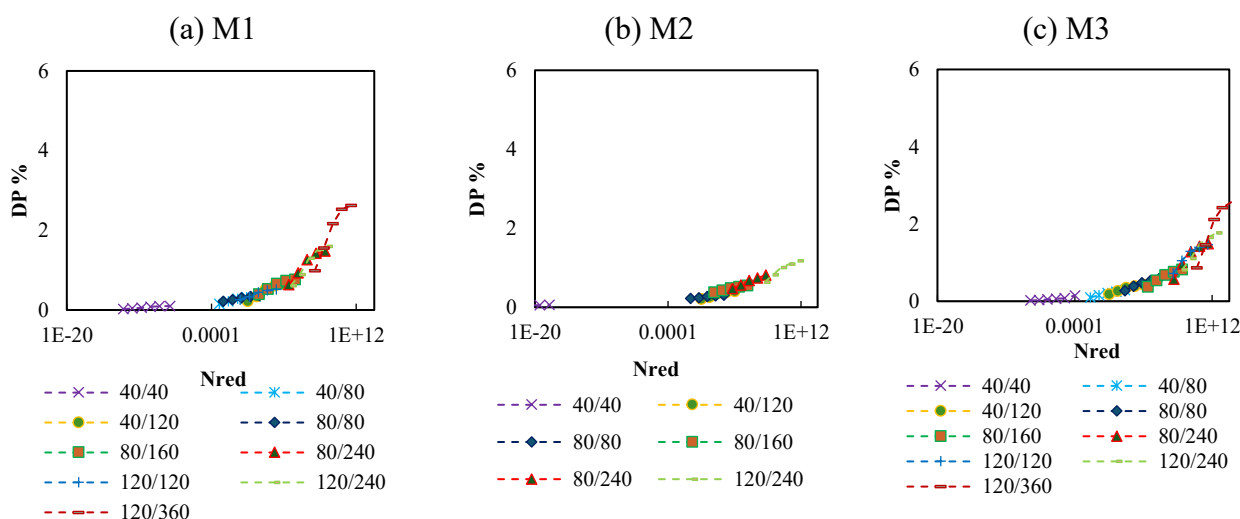
Figura 1. Estrutura padrão para avaliação do ATR

As análises mecanístico-empíricas foram realizadas com os coeficientes do modelo de Guimarães (2009) obtidos a partir das duas metodologias (Norma DNIT 179 e método DP S). O MR foi considerado linear, conforme apresentado na Tabela 2. Os coeficientes do modelo de Guimarães são apresentados na seção de resultados. Também foi analisada a influência do volume de tráfego. Para isso, foram verificados os ATRs para um tráfego leve ($N = 5 \times 10^5$), um tráfego médio ($N = 5 \times 10^6$) e um tráfego pesado ($N = 5 \times 10^7$). Essa classificação de tráfego se enquadra nos intervalos propostos pelo DNIT (2006).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Construção das curvas mestras

Com os resultados de DP obtidos no equipamento de ensaios triaxiais de cargas repetidas, foram geradas as curvas mestras e determinados os coeficientes do modelo de Guimarães (2009). A Figura 2 apresenta as curvas mestras para os seis materiais avaliados, considerando o par de tensão de referência de 40/120. Os gráficos para os demais pares podem ser obtidos usando os fatores de translação.





DOI: 10.29327/1430212.49-29

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO OTIMIZADO DE CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES A PARTIR DE SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS

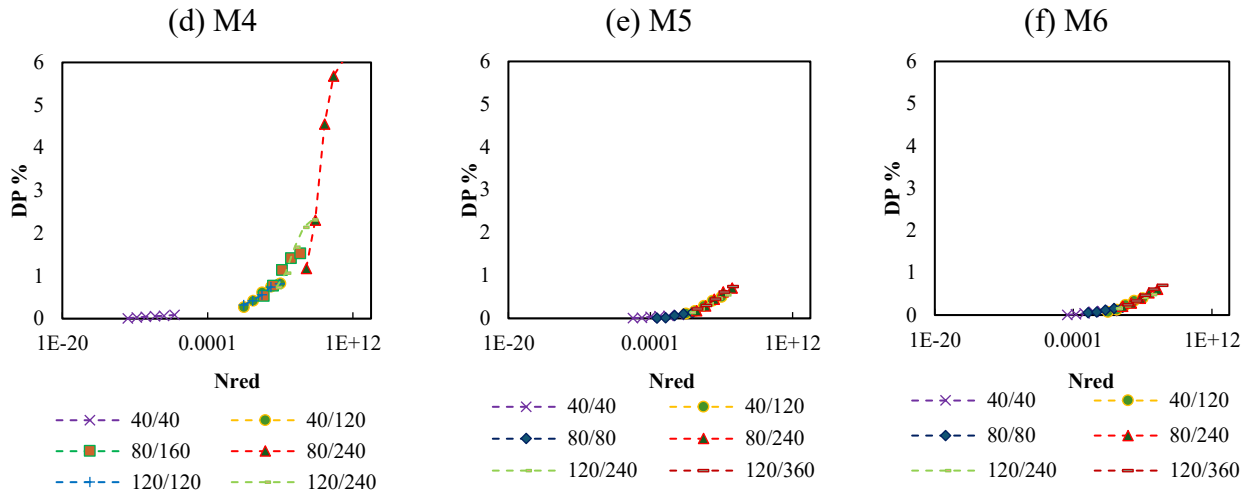


Figura 2. Curvas mestras dos materiais analisados para o par 40/120

Com as curvas mestras no par de referência e os fatores de translação, foram geradas as curvas para os demais pares, de cada material. Após esse procedimento, foram previstos os valores de DP pelo modelo de Guimarães para a obtenção dos coeficientes ψ_i . A Tabela 2 apresenta os coeficientes obtidos a partir do procedimento da Norma DNIT 179 (2018b) e com o Método DP S, considerando 10.000 ciclos por par de tensão, com exceção do mais severo, para o qual foram aplicados 150.000 ciclos.

Tabela 2. Coeficientes do modelo de Guimarães

Método	Coeficiente	Material					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6
DNIT 179	Ψ_1	0,2713	0,3513	0,5815	0,0428	0,1967	0,0884
	Ψ_2	-0,0085	0,1996	1,0241	-2,0025	-0,0558	-0,5535
	Ψ_3	1,3873	0,7116	0,6281	4,3048	0,5857	1,0924
	Ψ_4	0,0503	0,0432	0,0480	0,0701	0,0735	0,0831
	R^2	0,9831	0,5913	0,9572	0,9406	0,5989	0,9785
DP S	Ψ_1	0,2895	0,2159	0,5788	0,0479	0,0733	0,0928
	Ψ_2	-0,0045	0,3011	1,2410	-1,8979	-0,8586	-0,5149
	Ψ_3	1,2705	1,2609	0,5399	4,2117	1,2297	1,0330
	Ψ_4	0,0564	0,0601	0,0627	0,0781	0,0962	0,0827
	R^2	0,9730	0,9947	0,9707	0,9884	0,9554	0,9526

Observa-se que nos materiais M1, M4, M5 e M6 a tensão confinante foi inversamente proporcional à deformação. Contudo, o mesmo padrão não foi observado para os materiais M2 e M3. Cabe uma investigação futura sobre essa influência. Após a obtenção dos coeficientes do modelo de Guimarães, foram realizadas as avaliações da estrutura da Figura 1 para os dois cenários (DNIT 179 e DP S) em cada material. A Figura 3 apresenta a comparação do ATR total em cada situação analisada, nos três níveis de tráfego avaliados.

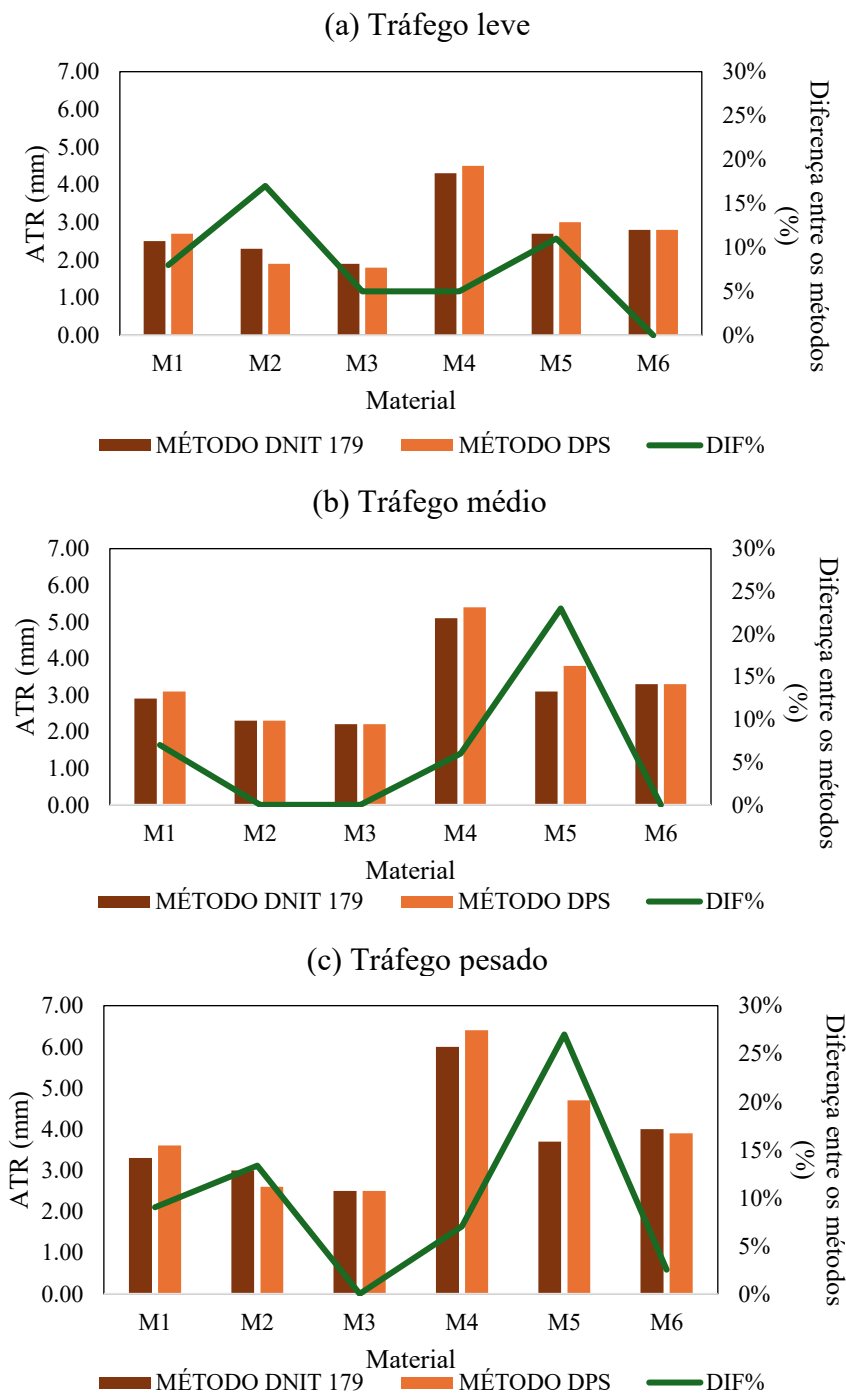


Figura 3. ATR final e diferenças percentuais entre métodos

A observação da Tabela 2 indica que os materiais que tiveram maior sensibilidade na comparação entre os métodos foram os que apresentaram uma maior variação do R^2 e entre os coeficientes do modelo. Essa análise é importante, pois permite identificar que o procedimento das curvas mestras pode retornar previsões da DP próximas do comportamento real.



DOI: 10.29327/1430212.49-29

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO OTIMIZADO DE CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES A PARTIR DE SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS

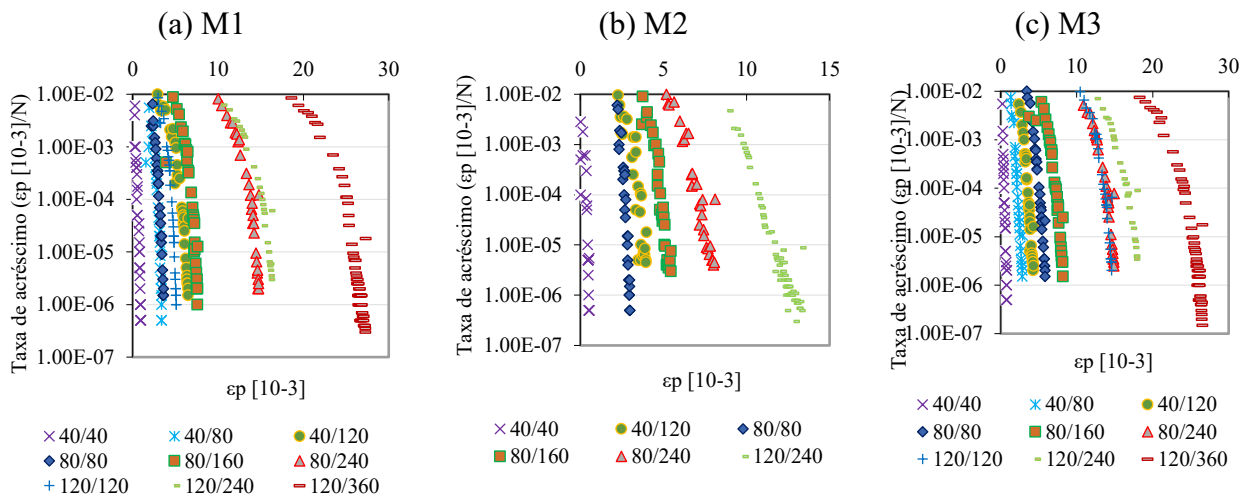
Pelas curvas mestras geradas para o par de tensões 40/120, observa-se que o material com a maior DP foi o M4. Esse resultado é sustentado por esse material ter sido compactado na energia normal, possuir alta porcentagem de argila, ser classificado como não-laterítico e argiloso, ter baixo MR e elevada umidade ótima. O par de tensões mais severo suportado foi o de 80/240. Naturalmente, as maiores porcentagens de DP foram referentes a ele.

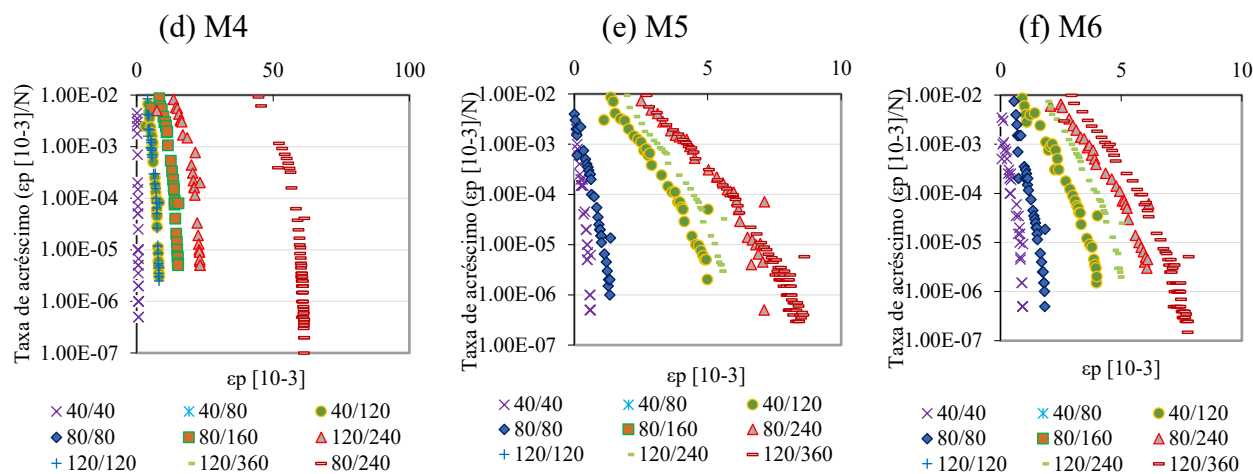
O resultado também se confirmou com a avaliação estrutural do pavimento quando o Material M4 compôs a camada de base. Nesta situação, foram obtidos os maiores afundamentos para os três níveis de tráfego. Contudo, o ATR máximo da estrutura de 6,40 mm, obtido pelo método DP S para o tráfego pesado, foi inferior ao limite de 12,5 mm estipulado pelo MeDiNa.

O Material M5 foi o que apresentou a maior diferença percentual entre os resultados do método DNIT 179 (2018b) e do método DP S. Apesar de ser caracterizado como uma brita e apresentar baixos percentuais de DP pela curva mestra, esse material apresentou uma sensibilidade ao tráfego e às tensões aplicadas. Assim, foi necessário investigar a curva de *shakedown* para observar se ele apresentava potencial de estabilização.

A Figura 4 apresenta a curva de *shakedown* para todos os materiais. Observa-se que houve estabilização somente para o par de tensões 40/40 para o Material M5 (Figura 4e). Os demais pares de tensões foram classificados como de tipos de comportamento de B e AB. As curvas de *shakedown* foram obtidas com a mesma quantidade de ciclos adotadas no método DP S, em que apenas o par de tensões mais severo é analisado até 150.000 ciclos.

O material principal, M6, é semelhante ao M5. A única diferença entre eles é a energia de aplicada na sua compactação, ou seja, intermediária para o M6 e modificada para o M5. Como consequência, o M6 apresentou menor afundamento do que o M5. Também se percebeu uma maior proximidade entre resultados obtidos considerando os Métodos DNIT 179 (2018b) e DP S quando a energia modificada foi adotada. Para esse material, a maior diferença percentual, 3%, ocorreu para o tráfego pesado.




 Figura 4. Curva de *shakedown* para os materiais analisados

O Material M2 também apresentou elevada diferença percentual quando comparados os resultados de ATR total, principalmente com relação ao tráfego leve. Contudo, considerando o tráfego médio, não houve diferença percentual evidente entre os Métodos DNIT 179 (2018b) e DP S. Isso convergiu com o espectro de N_{red} para o par de tensões 40/120, para o qual 70% da DP total foi atingida para um N_{red} de até 50.000.

O Material M3 apresentou um bom comportamento quando se consideraram os valores de DP obtidos pela curva mestra, mesmo possuindo uma elevada porcentagem de finos e uma alta umidade ótima. A sua classificação como solo de comportamento laterítico argiloso e a energia de compactação intermediária contribuíram para a obtenção de baixas porcentagens de DP, quando comparadas às do Material M4, que possui quantidade de finos semelhante e para o qual foi aplicada uma menor energia de compactação.

Por fim, observa-se uma maior sensibilidade do método DP S para os tráfegos leve e pesado, a depender do tipo de material, do seu comportamento quanto ao *shakedown* e da razão de tensões à qual o material é submetido. Com relação à razão de tensões, observa-se que o método DP S amplia a contribuição das tensões desvio e confinante no valor de ATR nos materiais M2 e M5. Para o Material M5, o aumento no valor de ATR é justificado por conta da não estabilização da DP para quase todos os pares de tensões. Enquanto isso, o Material M2 apresenta redução nos valores de ATR, pois os pares de tensões menores atingem o *shakedown*, sendo estes que chegam até a parte inferior da camada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou a resposta mecânica de uma estrutura de pavimento pelo Método MeDiNa, variando os materiais da camada de base. Esses materiais foram analisados por duas metodologias: (i) Norma DNIT 179 (2018b) e (ii) Método DP S. Foram comparados os valores finais de ATR obtidos para cada material e nível de tráfego avaliados.



DOI: [10.29327/1430212.49-29](https://doi.org/10.29327/1430212.49-29)

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO OTIMIZADO DE CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES A PARTIR DE SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS

Os resultados indicaram que mesmo com uma quantidade bem menor de ciclos por par de tensões, a previsão do ATR dos materiais para todos os pares de tensões se manteve próxima da obtida quando o número tradicional de 150.000 ciclos foi adotado. Também foi observada uma susceptibilidade do material quanto à ocorrência ou não do *shakedown*. Quando não ocorre o acomodamento, as diferenças percentuais entre os métodos tendem a ser mais elevadas. Outro fator que contribui para diferenças entre os métodos é a energia de compactação. Quanto maior a energia, mais semelhantes os resultados entre as metodologias.

O método DP S propõe a mudança da quantidade ciclos para 10.000 nos cinco pares de tensões iniciais e mantém a aplicação de 150.000 ciclos para o par de tensão mais severo, o 120/360 neste estudo, sendo os ensaios realizados a uma frequência de 2 Hz. Quando o material não atinge o par 120/360, o último par ensaiado deve ir até 150.000 ciclos. Assim, é importante realizar o ensaio seguindo a sequência dos pares: 40/40, 80/80, 40/120, 80/240, 120/240 e 120/360. Além disso, seis pares de tensão são suficientes para a caracterização da DP sem perda de acurácia. Desse modo, o método DP S proporciona uma redução de até 70% do tempo de ensaio, possibilitando uma análise que considera características como acomodação de deformações permanentes, umidade ótima, energia de compactação, granulometria e classificação geotécnica. Estudos adicionais estão em andamento para a avaliação de uma quantidade ainda mais ampla de materiais que tenham comportamentos distintos para contemplar as características pedológicas de todas as regiões do país.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Chamada Universal 01/2023, da Agência Nacional do Petróleo (ANP) por meio do PRH-4 e do CENPES/PETROBRAS.

REFERÊNCIAS

- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BARBOSA, D. S.; SILVA, D. C.; AGUIAR, M. F. M. Análise comparativa entre o novo método de dimensionamento nacional de pavimentos - MeDiNa e o método do DNIT. **Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET**, v. 1, pp. 861-872, ANPET, 100%Digital, 2021.
- BARKSDALE, R. D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. **Proceedings of the Third International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements**, Londres, Inglaterra, 1972.
- CABRAL, W. S. **Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da microrregião de Mossoró/RN**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, 2021.
- DNIT. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: IPR, 2006. 274 p.
- DNIT. **NORMA DNIT 134/2018 - ME: Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2018a.
- DNIT. **NORMA DNIT 179/2018 - IE: Pavimentação - Solos - Determinação da deformação permanente - Instrução de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2018b.



FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. Tese de Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecanístico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos**. Tese de Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

LEKARP, F.; DAWSON, A. Modelling Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials. **Construction and Building Materials**, v. 12, n. 1, pp. 9-18, 1998.

LEKARP, F.; ISACSSON U.; DAWSON, A. State of the art. II: permanent strain response of unbound aggregates. **Journal of Transportation Engineering**, v. 126, n. 1, pp. 76-83, 2000.

LIMA, C. D. A. **Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas**. Tese de Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

MONISMITH, C. L.; OGAWA, N.; FREEME, C. R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading. **Transportation Research Record**, v. 537, pp. 1-17, 1975.

MOTA, B. C.; UBALDO, M. O.; LIMA, C. D. A.; NASCIMENTO, L. A. H.; ARAGÃO, F. T. S. Análise da deformação permanente de materiais granulares a partir do conceito da curva mestra. **Anais da 48ª Reunião Anual de Pavimentação**, v. 1, pp. 1-10, ABPV, Foz do Iguaçu, 2023.

MOTA, B. C.; UBALDO, M. O.; LIMA, C. D. A.; NASCIMENTO, L. A. H.; ARAGÃO, F. T. S. Optimized characterization of the permanent deformation of unbound granular materials considering the master curve concept. **Proceedings of the 103rd Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting**, TRB, Washington, 2024.

PITANGUI, L. C. **Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico MeDiNa**. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 2019.

REZENDE, L. R. **Técnicas alternativas para a construção de bases de pavimentos rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 1999.

SILVA, M. F.; RIBEIRO, M. M. P.; FURLAN, A. P.; FABBRI, G. T. P. Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil. **Transportation Geotechnics**, v. 26, p. 100443, 2021. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100443.



COMPORTAMENTO RESILIENTE DE BRITA GRADUADA SIMPLES DE UM TRECHO DA RODOVIA BR-116/RS

Beatriz Oliveira de Sousa Silva¹; Lisley Madeira Coelho¹; Jonathan de Oliveira Guimarães¹; Antônio Carlos Rodrigues Guimarães¹

RESUMO

O módulo de resiliência (MR) é um parâmetro de crucial importância nas análises mecânicas que envolvem a estimativa das tensões e deformações na estrutura do pavimento quanto à ação do tráfego, visto que representa a capacidade do solo de resistir à deformação permanente sob cargas repetidas. Para este fim se faz necessária a realização dos ensaios fundamentais da mecânica dos pavimentos, notadamente o ensaio de módulo resiliente, que é calculado a partir da relação entre a carga aplicada e a deformação vertical resultante. Neste contexto, no presente estudo descreve-se o comportamento resiliente, considerando variados modelos para previsão do MR, de amostras de brita graduada simples (BGS) com diferentes teores de umidade, como também do revestimento asfáltico de um trecho da obra de melhoria da capacidade e duplicação da BR-116/RS, subtrecho Guaíba-Pelotas. Para complementar as análises dos ensaios dinâmicos de laboratório, foram coletados dados defletométricos, de forma a poder comparar os módulos elásticos obtidos nas retroanálises das bacias de deflexão com os módulos de resiliência de laboratório. As amostras foram moldadas utilizando-se os teores de umidade de 3,6%, 6,2% e 7,5%. Os resultados obtidos do MR médio foram, respectivamente, 181,32 MPa, 196,77 MPa e 224,26 MPa. Assim, a análise indicou uma relação direta entre a umidade do BGS e o MR, percebendo uma progressão crescente no valor médio do MR em resposta ao aumento da umidade, o que indica uma sensibilidade significativa da resposta resiliente do BGS às variações de umidade. Entretanto, identificou-se que não foi determinada a umidade ótima para o BGS, embora tenha sido constatado o aumento geral do MR com o aumento da umidade.

PALAVRAS-CHAVE: Mecânica dos Pavimentos; Módulo de Resiliência; Materiais de Pavimentação.

ABSTRACT

The resilience modulus (RM) is a parameter of crucial importance in mechanistic analyzes that involve the estimation of stresses and deformations in the pavement structure in relation to traffic action, as it represents the soil's ability to resist permanent deformation under repeated loads. To this end, it is necessary to carry out fundamental pavement mechanics tests, notably the resilient modulus test, which is calculated based on the relationship between the applied load and the resulting vertical deformation. In this context, the present study describes the resilient behavior, considering various models for predicting the RM, of samples of simple graded crushed stone (GCS) with different moisture contents, as well as the asphalt coating of a section of the capacity improvement work and duplication of BR-116/RS, Guaíba-Pelotas subsection. To complement the analyzes of the dynamic laboratory tests, deflectionometric data were collected, in order to be able to compare the elastic moduli obtained in the back analyzes of the deflection basins with the laboratory resilience moduli. The samples were molded using moisture contents of 3.6%, 6.2% and 7.5%. The results obtained from the average MR were, respectively, 181.32 MPa, 196.77 MPa and 224.26 MPa. Thus, the analysis indicated a direct relationship between BGS humidity and MR, noticing an increasing progression in the average MR value in response to increasing humidity, which indicates a significant sensitivity of the BGS's resilient response to humidity variations. However, it was identified that the optimal humidity for the BGS was not determined, although a general increase in RM was found with increasing humidity.

KEY WORDS: Pavement Mechanics; Resilience Module; Paving Materials.

¹ Instituto Militar de Engenharia, e-mail: beatrizoss@ime.eb.br; madeiralisley@gmail.com; jonathan.guimaraes@ime.eb.br; guimaraes@ime.eb.br



INTRODUÇÃO

A qualidade dos pavimentos viários exerce uma influência direta e significativa na eficiência operacional do transporte rodoviário e no panorama econômico de um país. Considerando a extensão territorial do Brasil e a predominância deste meio de transporte para o deslocamento de cargas e passageiros, é necessário assegurar a qualidade da infraestrutura de transportes, garantindo, conseqüentemente, os pavimentos em condições de desempenho satisfatório (Rocha, 2020).

O dimensionamento apropriado de um pavimento deve garantir que, ao longo da repetida passagem dos eixos dos veículos, não haja ocorrência de trincas excessivas na camada de revestimento devido à fadiga por deformação resiliente. Para isso, as espessuras das camadas da estrutura e suas características devem ser definidas a fim de atender as condições e os efeitos dinâmicos do tráfego (Pascoal, 2020).

As características de deformabilidade e resistência à ruptura por meio de provas de carga são obtidas através de coleta de amostras e ensaios de laboratório. Através desses dados torna-se possível definir a causa de problemas estruturais de pavimentos para restauração e/ou avaliação funcional.

Tratando-se da Mecânica dos Pavimentos, o Módulo de Resiliência (MR) é caracterizado através do comportamento elástico dos materiais sobre carregamento cíclico, podendo ser obtido por meio de ensaios de carga cíclica ou por meio da retroanálise das medidas de deflexão (Norback e Motta, 2018).

O objetivo principal do presente trabalho é descrever o comportamento resiliente, considerando variados modelos de enquadramento e diferentes teores de umidade, de amostras de brita graduada simples (BGS) utilizadas em um pavimento de um trecho da BR-116/RS.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pavimento Rodoviário e Mecânica dos Pavimentos

A mecânica dos pavimentos aborda o estudo do dimensionamento das camadas do pavimento para garantir que sejam capazes de suportar os esforços causados pelo tráfego de veículos e pelas condições climáticas. Medina e Motta (2015) ressaltam que para o dimensionamento adequado dessa estrutura, a escolha dos materiais deve considerar as condições às quais ela estará exposta, incluindo tráfego, clima, geologia e geotecnia, condições ambientais, topografia, drenagem e aspectos operacionais. Além disso, a seleção dos materiais deve levar em consideração a granulometria, a deformação permanente e o módulo de resiliência.

Módulo de Resiliência

Segundo Li e Selig (1994), o conceito de módulo de resiliência indica a elasticidade do material. Um material com alta elasticidade apresentará um alto MR, ou seja, esse material sofrerá pouca deformação elástica sob uma determinada tensão. Por outro lado, um material com baixa elasticidade apresentará um baixo MR, ou seja, esse material sofrerá uma maior deformação elástica sob a mesma tensão. Conforme as diretrizes da AREMA (2009), a avaliação da qualidade dos materiais utilizados nas camadas dos pavimentos é fortemente influenciada pelo módulo de resiliência. A norma DNIT 134/2018 – ME estipula que o módulo de resiliência, MR, seja



DOI: [10.29327/1430212.49-41](https://doi.org/10.29327/1430212.49-41)

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS QUANTO A MACROTEXTURA E MICROTEXTURA DE FORMA INDIVIDUAL E CONJUNTA EM VIAS URBANAS COM VELOCIDADE ATÉ 40 KM/H

determinado por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas, envolvendo a aplicação de 18 pares de tensões com frequência de 1Hz, entre outros critérios, podendo ser expresso pela Equação 1.

$$MR = \sigma_d / \varepsilon_r \quad (1)$$

Em que:

σ_d : tensão desviadora (MPa ou kgf/cm²); e

ε_r : deformação axial resiliente mm/mm (recuperável).

Medina & Motta (2015) propõem uma expressão para o módulo de resiliência utilizando o estado de tensões aplicado durante o ensaio triaxial de cargas repetidas e duas constantes k_1 e k_2 , conforme mostrado a seguir na Equação 2. Além disso, o módulo de resiliência também pode ser expresso em relação à tensão confinante e às constantes k_1 e k_2 , como apresentado na Equação 3.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (2)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (3)$$

Em que:

k_1 , k_2 : constantes de regressão do modelo obtidas com os resultados do ensaio triaxial de carga repetida;

σ_d : tensão desviatória; e

σ_3 : tensão confinante.

Na literatura, diversos modelos são definidos para determinar o módulo de resiliência. Por exemplo, Witczak e Rada (1981) realizaram um estudo no qual propuseram um modelo empírico a fim de prever o MR de misturas asfálticas baseado em propriedades volumétricas e mecânicas do material. Ni et al. (2002) propuseram um estudo no qual desenvolveram um modelo utilizando redes neurais artificiais para prever o MR de solos de subleito com base em diversas propriedades do solo. Titi et al. (2006) desenvolveram modelos de regressão para prever o MR de materiais de subleito e de base não ligados, baseados em propriedades físicas e características de carga. O estudo utilizou dados laboratoriais e de campo para formular equações de regressão que relacionam o MR a variáveis como o teor de umidade, a densidade seca, e as tensões de confinamento e desvio.

Para avaliação dos diversos modelos de referência utilizados neste estudo, considerou-se como parâmetro o coeficiente de determinação (R^2), visto que quanto mais próximo de 1 maior será a adequação do modelo de regressão para a determinação do MR, fornecendo uma boa medida da capacidade do modelo de explicar a variância dos dados. Na Tabela 1, são apresentadas as equações utilizadas para calcular os valores de MR e os respectivos valores de R^2 deste estudo. O software SysTrain© inclui um módulo (MRCal) que permite o cálculo dos parâmetros de vários modelos, e foi utilizado neste trabalho.

Tabela 1. Modelos para previsão de módulo de resiliência. (Santanab *et al.*, 2023).

Modelos de Referência	Equações
Composto (Svenson, 1980; Macêdo, 1996)	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$
Witczak e Rada (1981)	$MR = k_1 \cdot (\sigma_{sum}/Pa)^{k_2} \cdot (\sigma_d/Pa)^{k_3}$
Witczak e Usan (1988)	$MR = k_1 \cdot Pa \cdot (\sigma_{sum}/Pa)^{k_2} \cdot (\sigma_{oct}/Pa)^{k_3}$
Titi et al. (2006)	$MR = k_1 \cdot Pa \cdot (\sigma_{sum}/Pa)^{k_2} \cdot (\sigma_d/Pa + 1)^{k_3}$
Ni et al. (2002)	$MR = k_1 \cdot (\sigma_3/Pa + 1)^{k_2} \cdot (\sigma_3/Pa + 1)^{k_3}$
NCHRP I-28A (2004)	$MR = k_1 \cdot Pa \cdot (\sigma_d/Pa)^{k_2} \cdot (\sigma_{oct}/Pa + 1)^{k_3}$

Sendo:

MR: Módulo de Resiliência (MPa);

k_1 , k_2 e k_3 : Coeficientes de regressão;

σ_{sum} : soma das tensões principais/invariante de tensões (kPa);

σ_{oct} : Tensão octaédrica (kPa);

Pa: Pressão atmosférica;

σ_3 : Tensão confinante (kPa);

σ_d : Tensão desvio (kPa).

O modelo composto, refere-se a uma adaptação do modelo de Pezo (1993) e analisado por Macêdo (1996), podendo ser utilizada por qualquer tipo de solo, considerando os valores do conjunto de tensões confinante e desvio. Assim, segundo estudos dos coeficientes de correlação, R^2 tendem a atingir um valor maior que 0,9.

Na equação de Witczak e Rada (1981), é realizada pelos autores uma correlação entre os valores de MR, que vão influenciar no comportamento resiliente de materiais com granulometria retida na peneira 200. Conforme Macêdo 1996 a importância para este método é o grau de saturação e a energia de compactação do corpo de prova.

Na equação de Witczak e Uzan (1988) foi proposto o modelo considerando o primeiro invariante e a tensão cisalhante octaédrica, esta é responsável pelas deformações angulares ou distorções atuantes no plano octaédrico. Sendo utilizadas para materiais de granulometria grossa e fina.

Titi et al (2006) propõem a determinação das propriedades de módulo de resiliência de solos de Wisconsin, com classificação de solos de fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia, e solos siltsos. Na proposta de Ni et al. (2002), utiliza-se as pressões confinante, desvio e atmosférica para verificar o enquadramento do MR. Já o modelo proposto pela NCHRP (2004) apresenta aplicabilidade universal para materiais de comportamento não linear.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A BR-116, uma das principais artérias rodoviárias longitudinais do Brasil, desempenha um papel crucial nos diversos tipos de transporte e na integração regional e social. Essa rodovia promove a circulação de pessoas e a troca cultural entre diversas partes do país, facilitando a circulação de



DOI: 10.29327/1430212.49-41

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS QUANTO A MACROTEXTURA E
MICROTEXTURA DE FORMA INDIVIDUAL E CONJUNTA EM VIAS URBANAS COM VELOCIDADE ATÉ 40 KM/H

cargas e pessoas, além de promover a troca cultural entre diversas partes do país. Situada no corredor que atravessa o norte do Estado do Rio Grande do Sul até a fronteira com o Uruguai ao sul, esta rodovia estratégica serve como uma importante via de acesso não apenas para os centros urbanos e econômicos ao longo de seu trajeto, mas também para o porto marítimo de Rio Grande, um ponto vital para o comércio internacional da região. Além disso, essa rodovia complementa outros modos de transporte, como ferrovias e hidrovias, otimizando a logística e o escoamento da produção. Nesse contexto, a compreensão detalhada da localização e do ambiente circundante da BR-116 é apresentada na Figura 1.

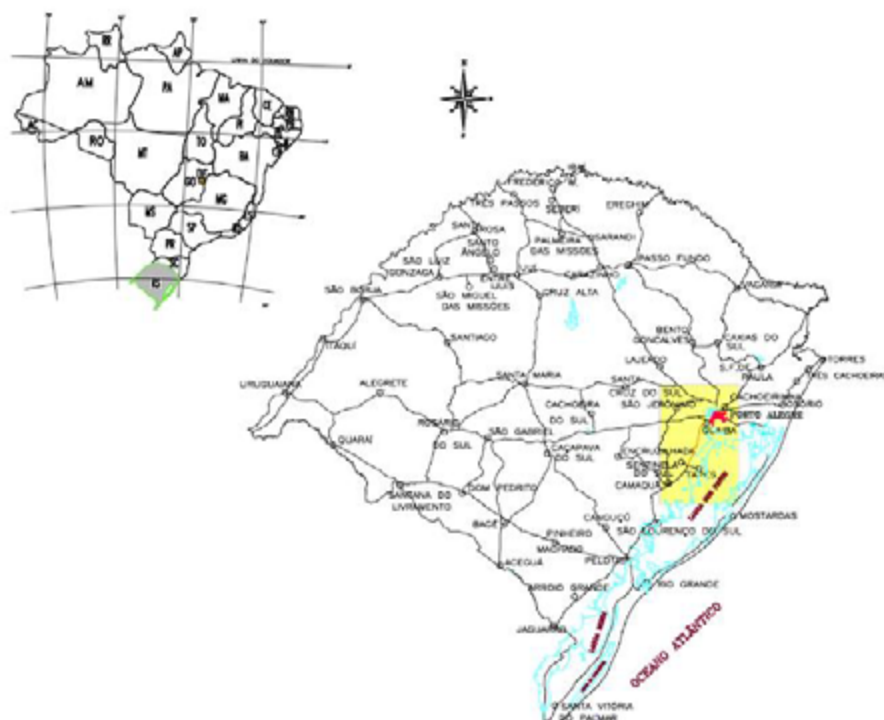


Figura 1. Localização da Rodovia BR-116/RS. (AUTOR, 2024).

Caracterização Física

A base da BR-116 a ser analisada neste estudo é uma base de brita graduada simples (BGS), composta por material pétreo de origem granítica proveniente das instalações de britagem da empresa Eldorado mineração Eireli, localizada na cidade de Eldorado do Sul/RS, estrada Monte Alegre, Km 4,4, distrito de Bom Retiro. Os ensaios de caracterização foram realizados no laboratório da Solotec, localizado na Rua Doutor Ernesto Miranda, Porto Alegre/RS.

Ensaio Mecânicos

Para analisar as propriedades mecânicas dos materiais, o módulo de resiliência é um parâmetro de extrema importância. A condução do ensaio triaxial de cargas repetidas replica, em ambiente laboratorial, as condições de carga encontradas em campo. Neste estudo, todos os procedimentos experimentais seguiram as diretrizes estabelecidas pela norma do DNIT para a determinação do



Módulo de Resiliência (DNIT 134/2018 – ME). O objetivo do ensaio foi avaliar o comportamento da camada de base, a partir da variação de umidade.

Para cada teor de umidade, foi moldado um corpo de prova utilizando-se o molde tripartido, conforme ilustrado na Figura 2. O processo de moldagem observou os procedimentos previstos na norma DNIT 443/2023 – ME, empregando a energia Proctor modificada. Após a moldagem, cada amostra foi submetida a ensaios específicos para determinar os valores de tensão de desvio aplicada, tensão confinante e módulo de resiliência. Esses ensaios são essenciais para avaliar a capacidade dos materiais de suportar cargas repetidas e prever seu desempenho a longo prazo sob condições de tráfego. Para cada estado de tensão foram obtidos os valores do MR com o auxílio de ferramentas computacionais.



Figura 2. Montagem de corpo de prova. (AUTOR, 2024).

Etapa de Modelagem

Cálculo dos Modelos para Avaliação do Módulo de Resiliência

A partir dos resultados obtidos pelo ensaio de Módulo de Resiliência para a amostra de BGS, foi possível realizar o enquadramento do padrão de comportamento resiliente em 6 (seis) modelos de previsão de comportamento. Para o cálculo dos parâmetros de cada modelo utilizou-se o módulo MRCalc do software SysTrain©. A partir daí, foi possível avaliar além dos valores absolutos de MR dos materiais, a realização de um estudo comparativo dos modelos de previsão selecionados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização Física

Os materiais granulares a serem utilizados na base de brita graduada apresentam as características físicas descritas na Tabela 2. Para a composição granulométrica da BGS, foi adotada a norma DNIT 141/2022 – ES, base estabilizada granulometricamente, com enquadramento na faixa A, com as seguintes porcentagens: brita 2” (27,5%), brita ¾ (27,5%) e pó de pedra (45,0%). O enquadramento granulométrico da mistura é observado na Figura 3.



DOI: 10.29327/1430212.49-41

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS QUANTO A MACROTEXTURA E
MICROTEXTURA DE FORMA INDIVIDUAL E CONJUNTA EM VIAS URBANAS COM VELOCIDADE ATÉ 40 KM/H

Tabela 2. Características físicas dos materiais granulares. (AUTOR, 2024).

ISC (%) na umidade ótima	176,59
Expansão (%)	0,00
Limite de Liquidez	NP
Limite de Plasticidade	NP
Equivalente de Areia (%)	63,30
Densidade Real do Agregado Graúdo (g/m ³) retido na peneira 3/4"	2,642
Densidade Aparente (g/m ³)	2,604
Absorção do Agregado Graúdo (%)	0,56
Índice de Forma (%)	0,80
Desgaste Los Angeles (%)	20,72
Teor de Argila em Torrões	Não

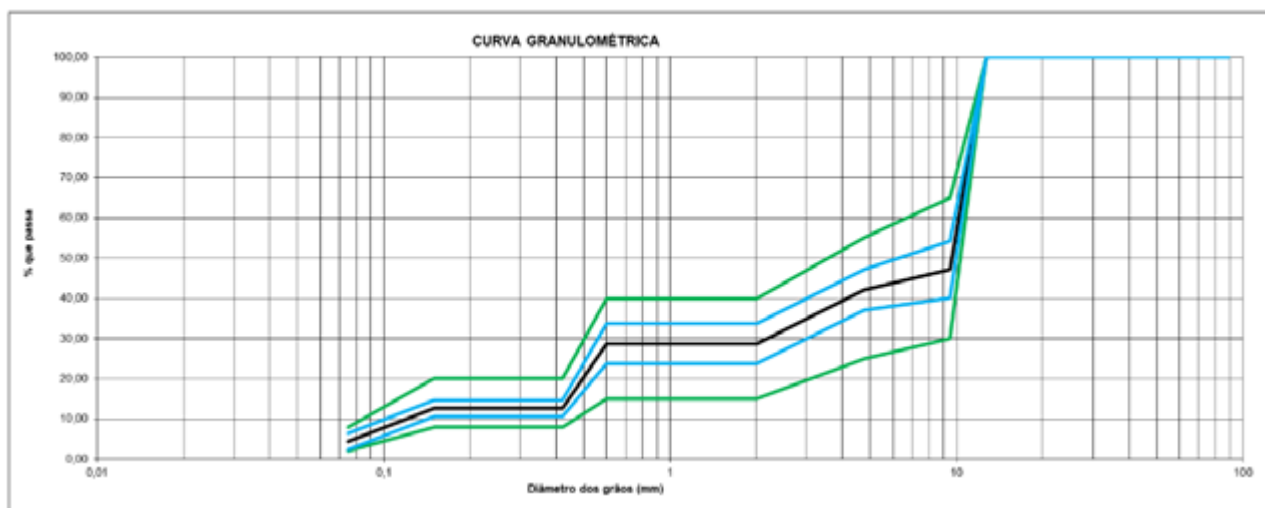


Figura 3. Enquadramento Granulométrico da Mistura. (AUTOR, 2024).

Ensaio de Módulo de Resiliência

Com base nos resultados dos ensaios triaxiais de cargas repetidas, de módulo de resiliência, para 18 pares de tensão, foram obtidos os valores médios de MR resultante a partir de uma média aritmética. Na Tabela 3 são apresentados os resultados para o MR médio de cada amostra, que se diferenciam pelo teor em porcentagem de umidade utilizada, sendo A1 (3,9%), A2 (6,2%) e A3 (7,5%), como também suas respectivas massas específicas aparente seca (MEAS).

Tabela 3. Resultados de MR médio obtidos em laboratório. (AUTOR, 2024).

Amostra	MR (MPa)	MEAS (g/cm ³)	Umidade (%)
A1	181,32	2,10	3,6
A2	196,77	2,15	6,2
A3	224,26	2,21	7,5



Observa-se que em todas as amostras os valores de módulo de resiliência estão acima de 100 MPa. Bernucci *et.al.* (2008) afirmam que valores de MR entre 100 e 400 MPa correspondem à materiais granulares, como por exemplo uma brita graduada simples. Em caráter geral, os resultados investigados de MR foram dentro do esperado para utilização em camada de base de pavimento rodoviário, indicando que a BGS estudada possui bom comportamento resiliente, em ambas as umidades investigadas.

Contudo, a observação de que o valor médio do módulo de resiliência aumentou à medida que a umidade da brita graduada foi incrementada sugere que a umidade ótima de referência (ou de projeto) pode não ser a verdadeira umidade ótima para esse material. Isso implica que existe potencial para melhorar ainda mais as propriedades resilientes da brita graduada através da otimização da umidade durante o processo de preparação do material.

Essa constatação destaca a importância de investigações adicionais para determinar a umidade ideal que maximize o desempenho do material. Porém, muito provavelmente tal variação de umidade ótima deve estar associada ao tamanho dos moldes utilizados nos ensaios de compactação, haja vista que para os ensaios triaxiais de cargas repetidas são adotados moldes tripartidos de dimensões 10 cm x 20 cm, enquanto a compactação foi feita nos moldes proctor tradicionais. Em 2023 o DNIT publicou a normal DNIT 443/2023 – ME, que é uma norma específica para solução dessas disparidades: Pavimentação – Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos – Método de ensaio.

Nas Figuras 4 a 9 são apresentados os gráficos com a variação dos valores de Módulo de Resiliência em relação à tensão confinante e à tensão de desvio com os respectivos resultados de R^2 para cada amostra.

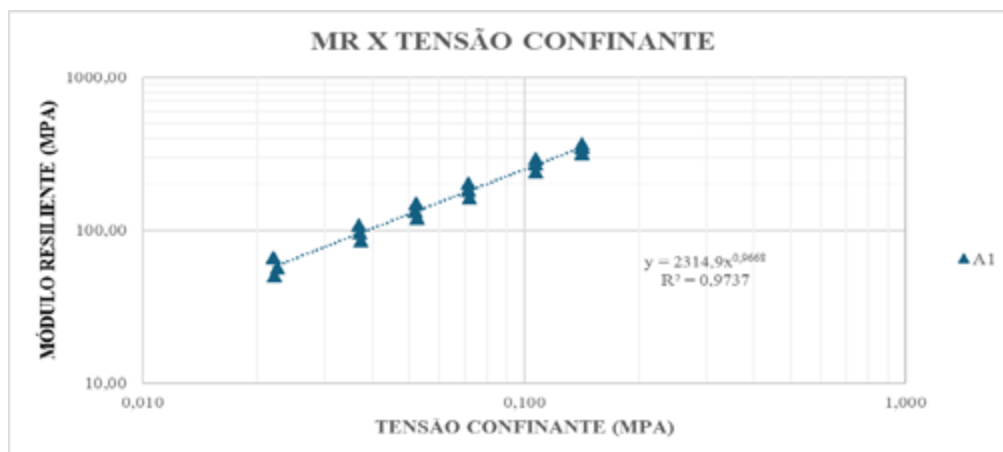


Figura 4. Valores de MR em função das tensões confinantes – Amostra A1 (AUTOR, 2024).



DOI: 10.29327/1430212.49-41

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS QUANTO A MACROTEXTURA E MICROTEXTURA DE FORMA INDIVIDUAL E CONJUNTA EM VIAS URBANAS COM VELOCIDADE ATÉ 40 KM/H

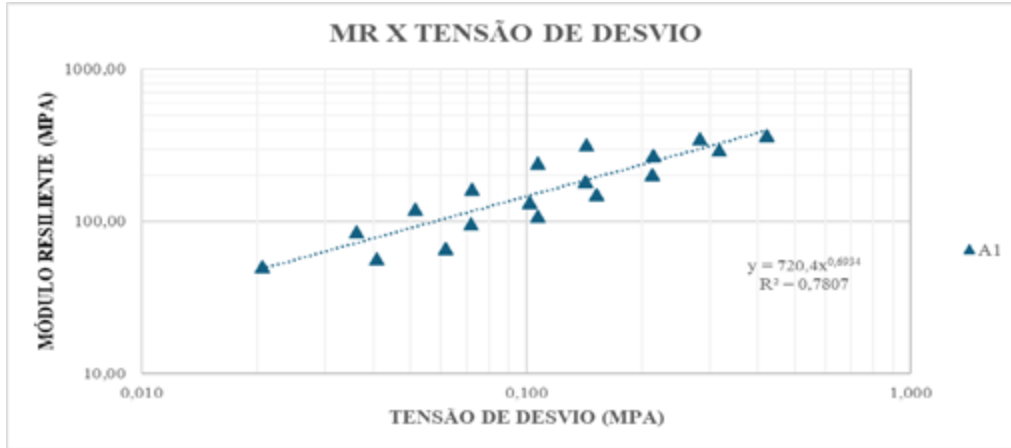


Figura 5. Valores de MR em função das tensões de desvio – Amostra A1 (AUTOR, 2024).

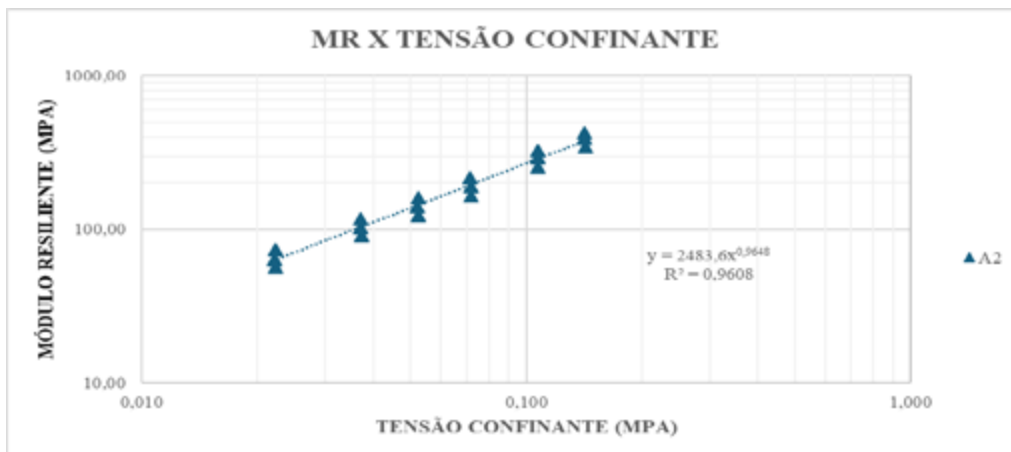


Figura 6. Valores de MR em função das tensões confinantes – Amostra A2 (AUTOR, 2024).

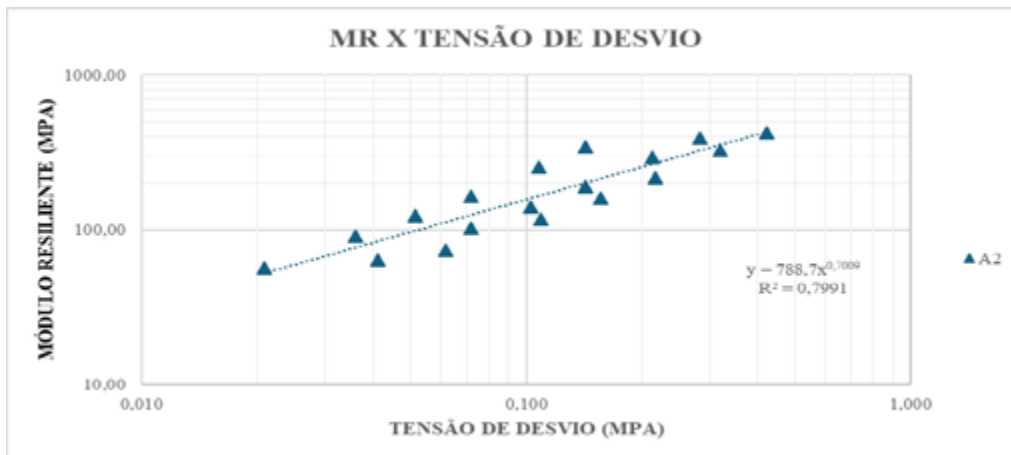


Figura 7. Valores de MR em função das tensões de desvio – Amostra A2 (AUTOR, 2024).

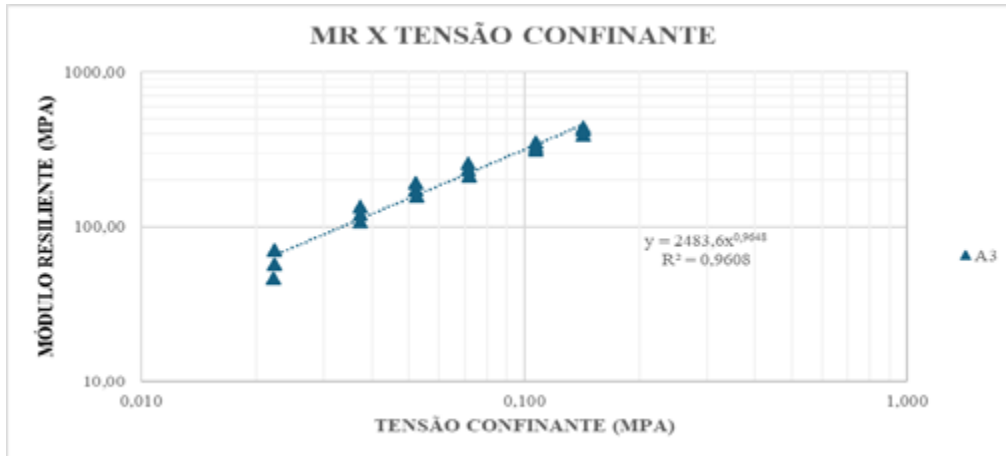


Figura 8. Valores de MR em função das tensões confinantes – Amostra A3 (AUTOR, 2024).



Figura 9. Valores de MR em função das tensões de desvio – Amostra A3 (AUTOR, 2024).

No que se refere ao comportamento dos materiais em relação às variações das tensões, observou-se que a BGS analisada nesse estudo tem grande influência tanto da tensão desvio, quanto da tensão confinante. Contudo, apresenta melhores correlações em função da tensão confinante. Além disso, é importante destacar que, apesar das variações na umidade durante o teste, os valores de R^2 permaneceram consistentes em todos os casos. Isso sugere que a variação de umidade não teve interferência nessa característica, visto que, os valores de R^2 são semelhantes. Essa constância nos valores de R^2 reforça a confiabilidade e a consistência dos resultados obtidos. No entanto, é importante ressaltar que mais pesquisas são necessárias para explorar completamente o impacto da umidade e outras variáveis ambientais no comportamento mecânico dessa BGS.

A Tabela 4 apresenta os resultados do enquadramento dos valores de MR obtidos para a BGS estudada, considerando diversos os modelos disponíveis no MRCalc do software Systrain, na qual são mostrados os coeficientes de regressão dos modelos selecionados, a fim de verificar o melhor enquadramento do comportamento resiliente.



DOI: 10.29327/1430212.49-41

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS QUANTO A MACROTEXTURA E
MICROTEXTURA DE FORMA INDIVIDUAL E CONJUNTA EM VIAS URBANAS COM VELOCIDADE ATÉ 40 KM/H

Tabela 4. Análise estatística dos modelos utilizados para estudo comparativo. (AUTOR, 2024).

Amostra	Coefficientes	Modelo Composto	Witzack e Rada (1981)	Witzack e Usan (1988)	Titi et al. (2006)	Ni et.al (2002)	NCHRP P1-28A
A1	k ₁	2071,7194	45,5296	375,1382	449,3418	50,7622	554,2161
	k ₂	0,8	1,16	1,16	1,16	1,8	1,16
	k ₃	0,16	-0,24	-0,24	-0,24	0,28	-0,52
	R ²	0,9983	0,9975	0,9975	0,9975	0,9792	0,999
A2	k ₁	2417,9805	44,0397	362,8626	434,6381	50,8692	571,8691
	k ₂	0,8	1,24	1,24	1,24	1,8	1,16
	k ₃	0,2	-0,24	-0,24	-0,24	0,36	-0,44
	R ²	0,9983	0,9978	0,9978	0,9978	0,9888	0,997
A3	k ₁	2375,5327	52,0037	403,4631	513,2368	64,4855	712,5074
	k ₂	0,8	1,24	1,24	1,24	1,88	1,2
	k ₃	0,12	-0,32	-0,32	-0,32	0,2	-0,68
	R ²	0,9931	0,9929	0,9929	0,9929	0,9617	0,9974

Em relação aos coeficientes de regressão, percebe-se que todos os valores de k_1 e k_2 são positivos, o que indica o aumento do MR em função da tensão confinante, e que os valores de k_3 foram positivos para os modelos “Composto e Ni et al. (2002)”, acarretando influência da tensão desvio em seu comportamento. O k_1 alcançou maiores valores para a situação que utilizou o modelo composto, sendo a amostra A2 a mais afetada. Comportamento inverso ocorreu para o k_2 , em que utilizando o modelo composto resultaram em menores valores desse coeficiente. Para o k_3 , os valores se apresentaram bem próximos. Em todos os casos, as estatísticas de R^2 apresentaram correlações satisfatórias, visto que todos os valores são bem próximos a 1,00.

CONCLUSÃO

Neste estudo, investigou-se o comportamento resiliente da BGS em relação aos diferentes níveis de umidade, com o objetivo de entender sua influência nas propriedades estruturais do material. Ao longo da análise, observou-se uma relação direta entre a umidade da BGS e o módulo de resiliência, com um aumento progressivo no valor médio do módulo de resiliência à medida que a umidade foi aumentada. Essa tendência indica uma sensibilidade significativa da resposta resiliente da BGS às variações de umidade, sugerindo a existência de uma umidade ótima que maximiza suas propriedades estruturais.

Além disso, identificou-se que, apesar do aumento geral do módulo de resiliência com o aumento da umidade, ainda não foi determinada a umidade ideal para a BGS. Portanto, há uma oportunidade para pesquisas futuras visando a otimização das propriedades resilientes da BGS através da identificação precisa da umidade ótima.

Em relação aos coeficientes de regressão dos modelos analisados, sugerem uma complexidade no comportamento resiliente da BGS, que responde tanto à tensão desvio quanto à tensão confinante. Através das correlações, não é possível definir qual o modelo que melhor se ajusta para obtenção do módulo de resiliência a partir coeficiente de determinação (R^2), visto que todos os modelos apresentaram excelentes ajustes, acima de 0,9. Adicionalmente, a análise dos coeficientes de



regressão destaca a importância de considerar demais modelos existentes na literatura para uma compreensão mais precisa do comportamento resiliente do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA). (2009). "Manual for Railway Engineering." AREMA, Landover, MD.
- Bernucci, L. B., Motta, L. M., Ceratti, J. A. P., Soares, J. B. (2008) Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ, 475 p.
- DNIT 134/2010 – ME. (2010). "Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio". Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasil.
- DNIT 141/2022 – ES. (2022). "Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço." Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasil.
- DNIT 443/2023 – ME. (2023). "Pavimentação - Solos - Ensaio de Compactação Utilizando Moldes Tripartidos - Método de Ensaio." Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasil.
- Li, D., & Selig, E. T. (1994). "Resilient Modulus for Fine-Grained Subgrade Soils." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 6, 939-957 p.
- Motta, L.M.G. DA; Medina, J. (2015) Mecânica dos Pavimentos. 3º ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2004). "Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design." *NCHRP Report 1-28A*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Ni, F., Ali, H.A., & Nazarian, S. (2002). "Prediction of Resilient Modulus of Subgrade Soils Using Artificial Neural Networks." *Transportation Research Record*, No. 1786, pp. 34-41.
- Norback, C., Motta, L. M. G. (2018) Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de duas misturas solo-brita. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Gramado, Rio Grande do Sul, 12 p.
- Pascoal, P. T. (2020) Estudo da influência da compactação no comportamento resiliente e deformação permanente de solo laterítico do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria / UFSM, 192 p.
- Rocha, M. L. (2020) Influência dos módulos de resiliência iniciais no procedimento de retroanálise de pavimentos flexíveis. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de Estruturas e Materiais, Universidade Federal de Juiz de Fora / UFJF, 247 p.
- Santana, L. A., Silva, M. J., Santos, P. H., & Oliveira, R. B. (2023). "Análise do módulo de resiliência de misturas asfálticas: Métodos e Influências." *Revista de Engenharia Civil*, vol. 14, no. 3, pp. 215-230.
- Systrain. (2016). Manual do SYSTRAIN – Versão 1.3. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil: Elgayer Engenharia.
- Titi, H. H., El-Badawy, S. M., & Awed, A. M. (2006). "Prediction of Resilient Modulus of Unbound Granular Materials and Subgrade Soils Using Regression Models." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1952, pp. 153-163.
- Witczak, M.W., & Rada, G.R. (1981). "Simple Performance Test for Superpave Mix Design." *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 50, pp. 600-632.



INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE TRÊS MATERIAIS GRANULARES NÃO LATERÍTICOS

Nádgyla Layana Tófolo Silva¹; Raquel Silva Ramos¹; Jaime Pinheiro Campos Sobrinho¹; Lucas Araújo da Silva¹; Mário Sérgio de Souza Almeida¹ & Weiner Gustavo Silva Costa¹

RESUMO

O conceito de resiliência em materiais refere-se à capacidade de retornar à sua forma original após sofrer deformações elásticas decorrentes de influências externas. Esta capacidade pode ser impactada por diversos fatores, incluindo a umidade, que pode afetar diretamente a rigidez do material. Diante desse contexto, torna-se relevante compreender como as variações de umidade podem influenciar na durabilidade de pavimentos. Neste estudo, objetivou-se avaliar o efeito da variação da umidade de compactação sobre o comportamento resiliente de três solos tropicais de granulação grossa, não lateríticos, coletados no leito da BR 030, no município de Boa Nova, Bahia. Como na fase de construção dos pavimentos admite-se uma variação da umidade de compactação, em relação ao teor de umidade ótimo obtido em laboratório, a análise realizada busca avaliar os impactos dessa variação na rigidez de cada solo, representada pelo módulo de resiliência (MR). De posse dos valores de MR dos solos ensaiados em diferentes umidades foi possível realizar análises tensão-deformação e estimar a variação de vida útil de um pavimento de referência idealizado. Os resultados indicam que a variação de umidade de compactação promove variação na rigidez do material e, conseqüentemente, na expectativa de vida útil de pavimentos asfálticos flexíveis. Em suma, este trabalho reforça a importância de um controle rigoroso de compactação durante a construção de pavimentos, visando prolongar a vida útil das rodovias e o desenvolvimento de pavimentos mais resistentes e duráveis, beneficiando a infraestrutura rodoviária e reduzindo custos de manutenção a longo prazo.

PALAVRAS-CHAVE: Solos tropicais; G-MCT; Pavimentação.

ABSTRACT

The concept of resilience in materials refers to the ability to return to their original shape after undergoing elastic deformations due to external influences. This ability can be impacted by various factors, including humidity, which can directly affect the stiffness of the material. In this context, it becomes relevant to understand how variations in humidity can influence the durability of pavements. This study aimed to evaluate the effect of compaction moisture variation on the resilient behavior of three coarse-grained tropical soils, non-lateritic, collected from the bed of BR 030, in the municipality of Boa Nova, Bahia. Since a variation in compaction moisture is allowed during the pavement construction phase, relative to the optimal moisture content obtained in the laboratory, the analysis conducted seeks to assess the impacts of this variation on the stiffness of each soil, represented by the resilient modulus (MR). With the MR values of the soils tested at different moisture levels, it was possible to perform stress-strain analyses and estimate the variation in the service life of an idealized reference pavement. The results indicate that the variation in compaction moisture promotes changes in the material's stiffness and, consequently, in the expected service life of flexible asphalt pavements. In summary, this work reinforces the importance of strict compaction control during pavement construction, aiming to prolong the service life of roadways and develop more resistant and durable pavements, benefiting road infrastructure and reducing long-term maintenance costs.

KEYWORDS: Tropical soils; G-MCT; Pavement.

¹ Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, tofolo.nadgyla@hotmail.com; raquelsilvaramos855@gmail.com; jaimecampos8811@gmail.com; lucas_araujo1999@hotmail.com; mario.almeida@ufrb.edu.br; weiner@ufrb.edu.br.



INTRODUÇÃO

A investigação sobre o Módulo de Resiliência (MR) é de fundamental importância, pois fornece uma análise minuciosa das propriedades mecânicas do pavimento. Para tanto, utiliza-se um carregamento vertical cíclico, que simula a resposta a carregamentos repetitivos aos quais os pavimentos são submetidos (LEVAY, 2023).

Conforme Bastos (2013), o comportamento resiliente de materiais granulares pode ser diretamente afetado por diversos fatores, como a umidade e o clima. Durante o período de construção dos pavimentos, suas camadas, incluindo a do subleito, podem apresentar desvios no teor umidade, o que pode influenciar diretamente o comportamento mecânico dos materiais. Desta forma, para garantir a qualidade da execução, são definidos os parâmetros de controle em que são estipuladas tolerâncias em relação ao teor de umidade ótimo. Essas observações mostram a importância de manter a umidade ótima do material dentro dos limites estabelecidos durante o processo de construção dos pavimentos, a fim de garantir sua durabilidade e desempenho adequados. Além disso, segundo Kern (2017) a granulometria e o grau de compactação são fatores que também podem interferir na qualidade do pavimento.

Nesse contexto, é válido observar que os processos geológicos e pedológicos que ocorrem nas zonas tropicais têm um impacto significativo nas propriedades e comportamento mecânico dos solos, resultando em características distintas em comparação com os solos de regiões não tropicais. A classificação de um solo como tropical não depende apenas de sua formação em áreas tropicais ou de clima úmido tropical, mas também de peculiaridades geotécnicas específicas (TAKEDA, 2006).

De acordo com Nogami e Villibor (1995) citado por Santos (2006), os solos lateríticos são uma tipologia de solos superficiais pedogenéticos, comumente encontrados em regiões tropicais úmidas de áreas bem drenadas. Uma das principais diferenças fundamentais entre os solos lateríticos e não lateríticos reside na estabilidade dos agregados argilosos diante das variações do teor de umidade (FREITAS *et al.*, 2020). Estes autores identificaram, em pesquisas realizadas, valores de MR significativamente maiores, mas o comportamento resiliente mais sensível a variações no teor de umidade quando comparado aos solos não lateríticos.

Considerando estes aspectos, o presente trabalho visa avaliar como a variação da umidade de compactação afeta o comportamento resiliente de três solos tropicais não lateríticos, a partir de ensaios de módulo de resiliência. Dessa forma, pretende-se facilitar a implementação de práticas de engenharia que garantam a longevidade e eficiência das estruturas de pavimento.

MATERIAL E MÉTODOS

O material a ser estudado foi coletado em um trecho não pavimentado da BR-030, no município de Boa Nova, Bahia, localizado em uma região de granulitos indiferenciados e coberturas detrito-lateríticas, onde as coordenadas de início e fim são $-14^{\circ}22'59''$ S, $-40^{\circ}11'31''$ O e $-14^{\circ}23'6''$ S, $-40^{\circ}11'13''$ O. As amostras do solo fazem parte do revestimento primário da rodovia e foram retiradas do leito em profundidades entre 0 e 60 cm da superfície (Figura 1), totalizando cerca de 120 kg de cada material. As amostras foram identificadas como Solo 1, 2 e 3.



DOI: [10.29327/1430212.49-48](https://doi.org/10.29327/1430212.49-48)

INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE TRÊS MATERIAIS GRANULARES NÃO LATERÍTCOS



Figura 1. Coleta dos solos.

Caracterização dos Solos

No que tange ao estudo de análise comportamental do solo, se faz necessário a realização de ensaios para caracterizá-lo. Assim, o primeiro passo no processo consistiu no quarteamento das amostras com o intuito de dividi-las em partes representativas e homogêneas. Por conseguinte, foram realizados diversos ensaios conforme normas específicas para avaliar as características dos materiais.

A distribuição granulométrica foi determinada conforme NBR 7181 (2016), limites de consistência, de acordo com o ME DNER 82 (DNER, 1994c) e ME DNER 122 (DNER, 1994e) e determinação da massa específica dos grãos de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 2016).

Os materiais também foram classificados segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e a classificação AASHTO.

Classificação pela Metodologia MCT e G-MCT

Foi realizada a classificação para solos tropicais de granulação grossa (G-MCT), para finalidades rodoviárias, com base nos grupos “tipo granulométricos” e na metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) segundo a norma DNIT 444/2023 – CLA (DNIT, 2023c). Se a porcentagem retida na peneira de abertura 2,0 mm for maior do que 10 %, prossegue-se com a classificação em um dos grupos de classificação G-MCT e, se for menor, segue-se com a classificação MCT, conforme norma DNIT 259 – CLA (DNIT, 2023a).

A classificação pela metodologia MTC é realizada por meio dos ensaios de Compactação mini-MCV e a Perda de Massa por Imersão (PI), em conformidade com a norma DNIT 258 (DNIT, 2023a) (Figura 2).

Após esse ensaio, a classificação dos materiais granulares foi realizada pelo método G-MCT, conforme a norma DNIT 444/2023 – CLA (DNIT, 2023c). Este processo envolve a análise do percentual de materiais que passam pelas peneiras de 2 mm e 0,075 mm.

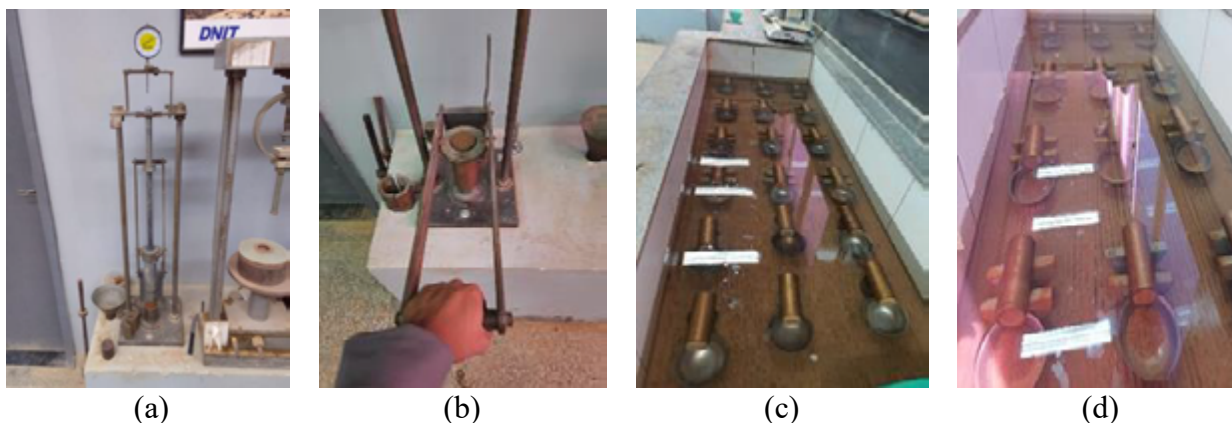


Figura 12. Procedimento experimental da metodologia MCT: (a) Compactação; (b) extrusão do corpo de prova (CP) do molde; (c) CP imersos em água; (d) CP após imersão em água (SANTOS *et al.*, 2022).

Preparação e Compactação dos Materiais

Para avaliação do comportamento mecânico desses materiais quando compactados, foi realizado o ensaio de compactação, compreendendo a seleção e preparação de cinco amostras de 4 kg de cada material, conforme a norma ME DNIT 443 (DNIT, 2023b). Estas amostras foram umedecidas com diferentes teores de umidade. Cada porção do solo foi então compactada em um cilindro tripartido de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, na energia de Proctor intermediária.

Ensaio de Módulo de Resiliência

O comportamento mecânico dos solos foi avaliado por intermédio do ensaio de Módulo de Resiliência (MR), conforme as diretrizes estabelecidas pela ME DNIT 134 (DNIT, 2018), os materiais previamente compactados foram submetidos a séries de pares de combinações de tensões aplicadas. Os corpos de prova da curva de compactação tiveram o ensaio iniciado pela fase de condicionamento feito apenas com o primeiro par de tensões ($\sigma_3 = 0,07$ MPa e $\sigma_d = 0,07$ MPa), aplicando 500 repetições para materiais de subleito como proposto pela norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018). Em seguida foi determinado o MR aplicando a sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência para materiais de subleito como proposto pela norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018). Essas tensões foram aplicadas a uma frequência de 1 Hz, que consiste em um pulso de carga de 0,1 segundo, seguido por um intervalo de repouso de 0,9 segundo (equivalente a 60 ciclos por minuto).

Ao término do ensaio, o corpo de prova foi pesado, e então colocado em uma estufa com temperatura controlada em torno de 110 °C, por um período de 48 horas.

Foi avaliado o efeito da umidade de compactação no comportamento resiliente dos solos. Os ensaios de Módulo de Resiliência (MR) foram realizados nos 3 materiais conforme a norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018). Cada corpo de prova compactado para determinação da curva de compactação no cilindro tripartido de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura foi ensaiado na sua respectiva umidade de compactação.

A relação entre a tensão (σ_d) e a deformação resiliente (ϵ_r) determina o módulo de resiliência para cada par de tensões aplicada, conforme a Equação 1.



DOI: 10.29327/1430212.49-48

INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE TRÊS MATERIAIS GRANULARES NÃO LATERÍTCOS

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

De posse dos MR calculados, para diferentes pares de tensões testados foi possível determinar as constantes de k_1 , k_2 e k_3 do modelo de variação do módulo de resiliência, de acordo com a equação 2 con.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (2)$$

Em que:

MR: módulo de resiliência [MPa];

k_1 , k_2 e k_3 : coeficientes de regressão constantes;

σ_3 : tensão confinante [MPa];

σ_d : tensão desvio [MPa].

Análise Mecanicista de um Pavimento de Referência

Para avaliar a consequência da variação de rigidez causada pela compactação de cada solo em teores de umidade distintos do teor de umidade ótimo de cada solo, realizou-se análises tensão-deformação para avaliação estrutural de um pavimento de referência (Figura 3a). Estas análises tensão-deformação foram realizadas no software Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), sub-rotina do Método Nacional de Dimensionamento de pavimentos asfálticos (MeDiNa), para os diferentes solos quando utilizados como camada de base. Nas análises realizadas no AEMC a interface entre as camadas do pavimento foi considerada como aderida e os módulos foram utilizados com variação não linear e, conseqüentemente, foram adotadas as respectivas constantes de regressão determinadas a partir dos ensaios de MR (Equação 2) para cada solo e cada condição de umidade.

Nestas análises aplicou-se uma pressão de pneu de 0,56 MPa em um raio de atuação de 10,8 cm (representando a carga de uma roda do eixo padrão de 80 kN, ou 8,2 t), para obtenção dos valores de: (i) deslocamento vertical no topo do revestimento (D); (ii) deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t); (iii) deformação vertical no topo do subleito (ϵ_v). Todas as análises foram realizadas entre as duas rodas e sob a roda do semi-eixo padrão, ou seja, nos pontos A, B, D, E, F e G da Figura 3b, respectivamente. Em todas as análises, a resposta elástica mais crítica (embaixo da roda ou entre as rodas) foi levada em consideração para a avaliação do comportamento do pavimento.

Após a realização da análise estrutural, foi calculado o número equivalente de operações de eixo simples de rodas duplas de 8,2 t acumulado máximo (N_{adm}), o qual o pavimento é capaz de suportar (N_{tr} , N_{ir} e N_{sub}). Foram utilizadas as equações 3 a 5 (DER-SP, 2006) e os valores de k e n , conforme Tabela 1. É importante ressaltar que, das equações apresentadas na Tabela 1, a Equação 4 faz referência aos fatores de equivalência de carga (FEC) da AASHTO, para a determinação do N_{adm} , e as Equações 3 e 5 fazem referência aos FEC da USACE.

Os valores de MR e coeficiente de Poisson das camadas de revestimento, sub-base e subleito foram os mesmos adotados por Carvalho *et al.* (2020) e estão apresentados na Tabela 2.



Nádglya Layana Tófolo Silva, Raquel Silva Ramos,
Jaime Pinheiro Campos Sobrinho, Lucas Araújo da Silva,
Mário Sérgio de Souza Almeida & Weiner Gustavo Silva Costa

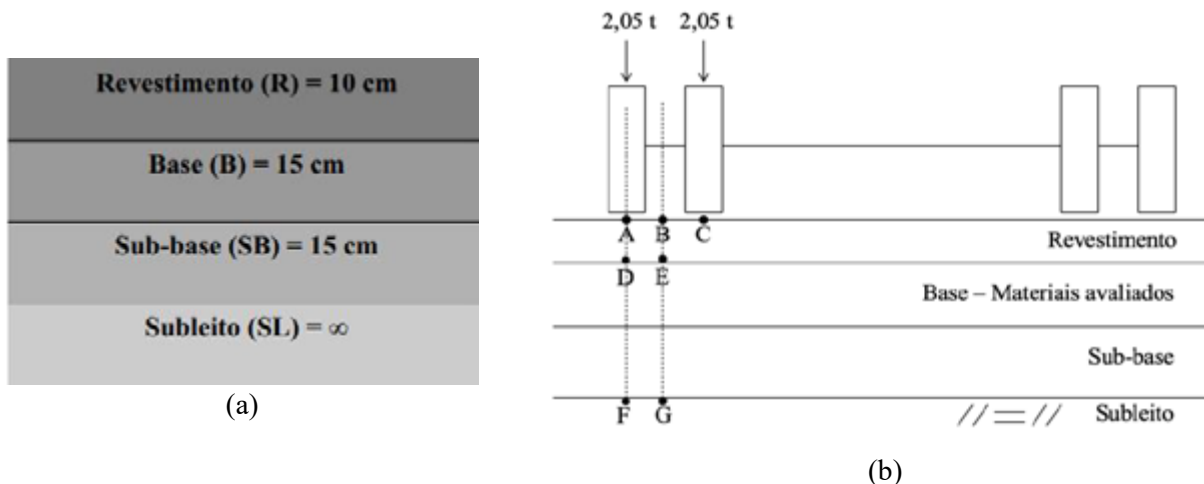


Figura 3. (a) Pavimento de Referência (adaptado de Carvalho et al., 2020); e (b) Pontos de aplicação de carga e determinação das respostas elásticas.

Tabela 1. Equações e parâmetros utilizados para o cálculo do número Nadm (N_{tr} , N_{ir} e N_{sub})

Local de Análise	Equação	k	n	Autoria
Topo do revestimento Equação 3	$N_{tr} = \sqrt[n]{\frac{10^k}{D}}$	3,01	0,176	DNER PRO 11 (DNER, 1979)
Fibra inferior do revestimento Equação 4	$N_{ir} = k \times \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^n$	$1,092 \times 10^{-6}$	3,512	FHWA (1976)
Topo do subleito Equação 5	$N_{sub} = k \times \left(\frac{1}{\epsilon_v}\right)^n$	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762	Dormon e Metcalf (1965)

Fonte: DER-SP (2006)

Em que:

N_{tr} : N_{adm} para o topo do revestimento a ser comparado com o N_{USACE} ;

N_{ir} : N_{adm} para a fibra inferior do revestimento a ser comparado com o N_{AASHTO} ;

N_{sub} : N_{adm} para o topo do subleito a ser comparado com o N_{USACE} ;

D: deslocamento vertical/deflexão (mm) no topo do revestimento;

ϵ_t : deformação específica horizontal de tração para a camada de revestimento;

ϵ_v : deformação específica vertical de compressão no topo do subleito;

k e n: coeficientes determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo de mistura asfáltica, e modificados para refletir o desempenho no campo.

Tabela 2. Valores de MR e ν das camadas (CARVALHO et al., 2020).

Camada	MR (MPa)	ν
Revestimento	3500	0,30
Sub-base	225	0,35
Subleito	132	0,40



DOI: 10.29327/1430212.49-48

INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE TRÊS MATERIAIS GRANULARES NÃO LATERÍTCOS

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização dos Solos

Os resultados apresentados na Tabela 3 referem-se às características físicas e à classificação dos solos, evidenciando semelhanças e diferenças entre os três furos analisados. Observa-se um maior teor de pedregulho do Solo 1, de finos no Solo 2 e de plasticidade do Solo 3. Há variação significativa no índice de plasticidade e granulometria, indicando diferentes comportamentos do solo.

Tabela 3. Características físicas e classificação das amostras de solos.

Características e Classificação	Solo 1	Solo 2	Solo 3
Argila (%)	5,0	15,6	14,7
Silte (%)	11,4	15,9	12,0
Fina	13,4	16,0	15,2
Areia (%)	12,3	11,4	11,4
Média	14,0	24,3	20,7
Grossa	44,0	16,9	25,9
Pedregulho (%)	22	26	30
Limite de liquidez (%)	17	21	17
Limite de plasticidade (%)	5	5	13
Índice de plasticidade (%)	2,63	2,67	2,66
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	7,19	10,55	6,65
w _{ót} (%)	2,146	2,030	2,200
ρ _{dmáx} (g/cm ³)	A-1-b (0)	A-2-4 (0)	A-2-6 (0)
Classificação AASHTO	SC-SM	SC-SM	SC
Classificação SUCS			

O elevado teor de pedregulho sugere que o Solo 1, com menor índice de plasticidade e baixo teor de argila, é menos coeso. O Solo 3 tem uma maior tendência à plasticidade devido ao teor de argila. O Solo 2 apresentou comportamento intermediário entre os outros dois materiais.

Essas diferenças na composição granulométrica e nas propriedades físicas dos solos afetam diretamente sua classificação. Pela classificação AASHTO, as amostras foram classificadas como A-1-b, A-2-4 e A-2-6, que indicam materiais granulares com a presença de pedregulhos, areia siltosa ou argilosa. Já pela classificação SUCS, o Solo 1 e o Solo 2 são classificados como SC-SM, uma mistura de areia e silte com argila; e o Solo 3 é SC, caracterizando uma composição predominantemente de areia argilosa.

Com relação aos parâmetros ótimos de compactação o maior valor de umidade ótima foi observado para o Solo 2, que é o material com maior teor de finos (silte e argila). A maior massa específica seca máxima foi observada para o Solo 3. O Solo 1 é o material com maior teor de material retido na peneira de abertura 2 mm (pedregulho).

Classificação do solo por MCT e G-MCT

Os resultados da classificação G-MCT estão apresentados na Tabela 4. É possível concluir que, conforme o ensaio MCT, todos os três solos estudados se classificam como arenosos não lateríticos (NA'). Este grupo inclui areias quartzosas que possuem finos, mas com comportamento não laterítico, com a possibilidade de conter mica na fração areia. Os solos apresentaram um coeficiente de argilosidade c' médio, indicando um equilíbrio entre a presença de argila e outros componentes



granulométricos (VILIBOR e ALVES, 2019).

Além disso, a análise da fração granular grosseira pelo método G-MCT apresentou variações significativas nos três solos estudados. O Solo 1 e o Solo 3 foram classificados como um material classificado como solo com pedregulho (Sp), enquanto o Solo 2 foi classificado como granular com finos (Gf). Essa diversidade na composição granulométrica sugere diferenças nas propriedades mecânicas e comportamentais dos solos.

Tabela 4. Classificação das amostras conforme MCT e G-MCT.

Amostra	Classificação MCT	Classificação G-MCT
Solo 1	NA'	Sp
Solo 2	NA'	Gf
Solo 3	NA'	Sp

Módulo de Resiliência

A relação entre a MR médio e a massa específica seca *versus* a umidade das duas misturas, bem como do solo puro, são mostradas na Figura 5a. Na Figura 5b a variação do MR médio em função do desvio da umidade ótima. Para o Solo 2 (SC-SM, A-2-4 e Gf-NA') observa-se comportamento de variação do MR semelhante ao comportamento da massa específica seca na curva de compactação com um valor de MR máximo próximo da umidade ótima. Para o Solo 1 (SC-SM, A-1-b e Sp-NA'), o comportamento foi semelhante, mas com um valor de MR máximo para umidade cerca de 1,6% abaixo da ótima. Já para o Solo 3 (SC, A-2-6 e Sp-NA'), houve um aumento do MR médio com o decréscimo no teor de umidade de compactação. Esse comportamento mostra a importância do controle de compactação frente ao comportamento tensão-deformação destes materiais quando utilizados com camadas de pavimentos.

Ressalta-se que pontos no ramo úmido ou seco que não foram ensaiados se deve ao fato de o material não suportar o ensaio visto que a DNIT 134 recomenda que durante o condicionamento, ou em qualquer outra fase do ensaio, se for alcançada uma deformação permanente acumulada igual ou maior que 5% da altura do corpo de prova, o ensaio deve ser interrompido e o resultado desconsiderado.

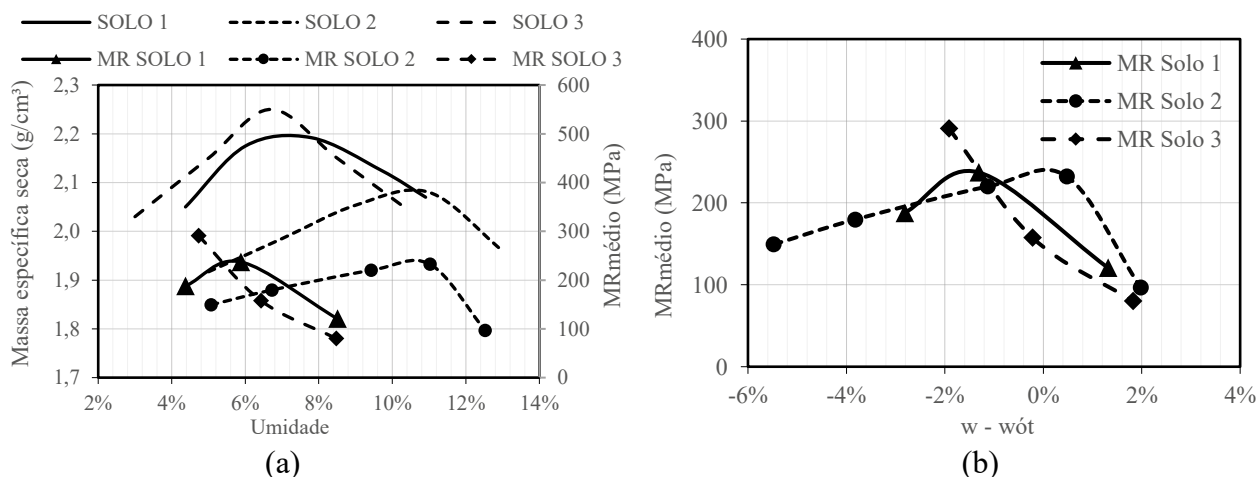


Figura 5. (a) Relação entre a MR e a massa específica seca versus a umidade e curvas de compactação; e (b) Relação entre a MR e o desvio da umidade ótima.



DOI: 10.29327/1430212.49-48

INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE TRÊS MATERIAIS GRANULARES NÃO LATERÍTCOS

Na Figura 6 são apresentados resultados de MR para diferentes umidades de compactação em função da tensão confinante e tensão desvio. Para o Solo 1 observa-se que com a elevação da umidade de compactação, uma variação da dependência do MR em relação às tensões desvio (σ_d) e uma maior variação do MR com a tensão confinante (σ_3). Já para o Solo 2 ocorre uma maior variação do MR com as tensões desvio (σ_d) com um comportamento semelhante entre os ensaios com umidades diferentes. Isso pode ser explicado pelo maior teor de finos desse material em relação aos demais. Estes comportamentos também podem ser observados a partir da Tabela 5.

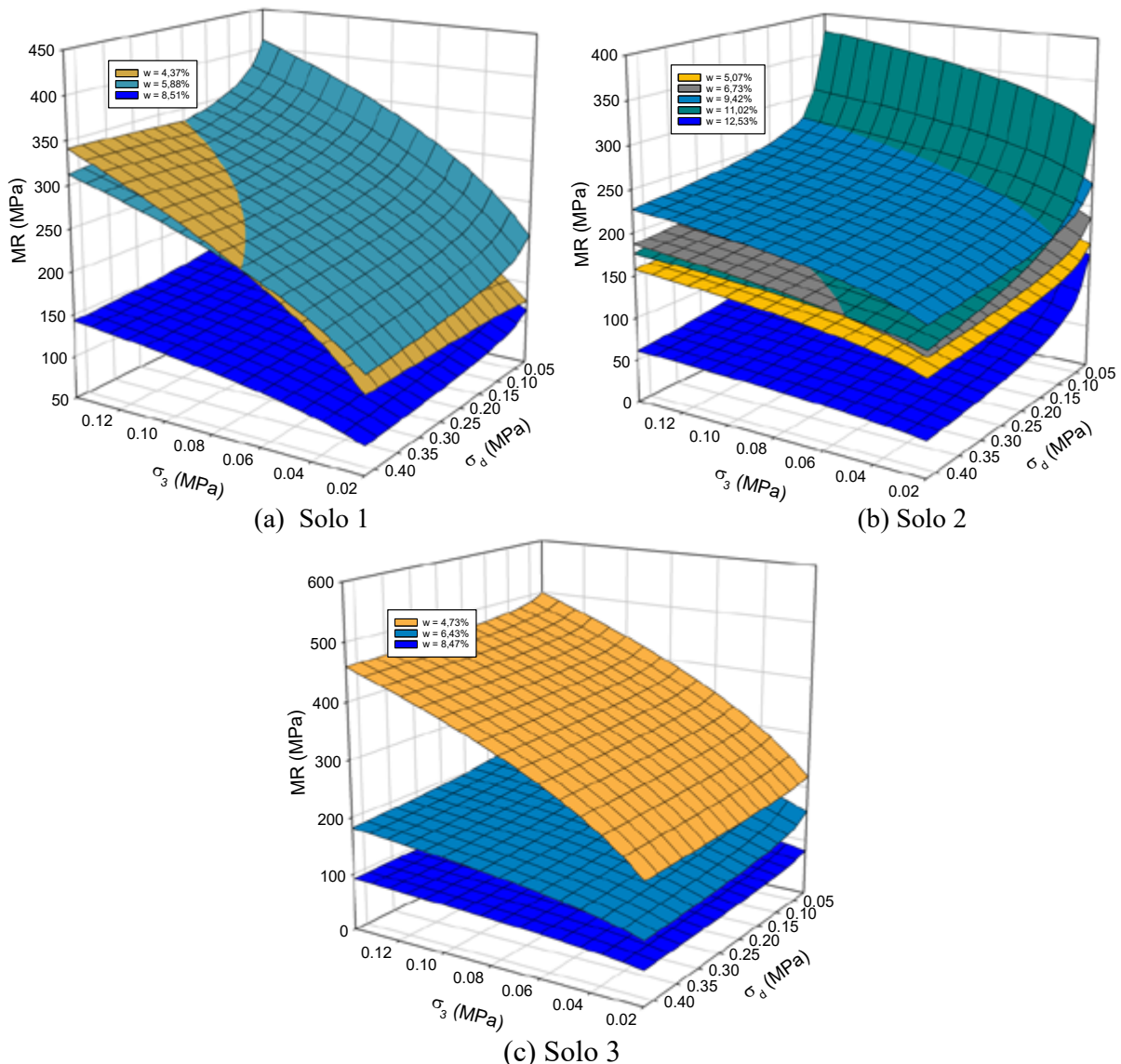


Figura 6. MR x tensões desvio e confinante para diferentes umidades de compactação de cada Solo.

Para o Solo 3 o que é mais nítido é a elevada redução do MR do ramo seco para o ramo úmido da curva de compactação.

Outro ponto importante que pode ser notado é com relação ao grau de compactação dos corpos de prova. O caso do Solo 1, por exemplo, mostra que mesmo com um elevado grau de compactação uma



umidade cerca de 1 % acima da ótima leva a redução do $MR_{\text{médio}}$ a metade de um ponto cerca de 1% abaixo da ótima.

Tabela 5. Ajuste do modelo combinado de MR para os solos.

	Umidade (%)	GC (%)	$MR_{\text{médio}}$ (MPa)	k_1	k_2	k_3	R^2
Solo 1	4,37	93,2	187,77	875,81	0,468	0,027	0,99
	5,88	98,9	237,24	570,63	0,347	-0,090	0,98
	8,51	98,9	120,69	223,92	0,280	-0,112	0,93
Solo 2	5,07	91,9	149,27	207,17	0,189	-0,111	0,55
	6,73	94,5	179,65	242,01	0,183	-0,115	0,58
	9,42	99,1	219,99	286,49	0,165	-0,106	0,62
	11,02	99,8	232,33	180,25	0,124	-0,252	0,93
	12,53	95,4	96,50	63,52	0,196	-0,397	0,93
Solo 3	4,73	93,7	290,78	1022,11	0,420	-0,038	0,99
	6,43	99,9	157,74	277,79	0,268	-0,118	0,93
	8,47	95,1	80,166	127,45	0,214	-0,098	0,95

Para os casos dos corpos de prova com R^2 mais baixos do Solo 2 o que se observou foi que o MR não sofre influência das tensões confinante e desvio, oscilando em torno de um valor médio.

Estimativa de vida útil do pavimento de referência

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos nas simulações realizadas no software AEMC, para o cálculo da deflexão (D) no topo do revestimento, das deformações de tração na fibra inferior do revestimento em concreto asfáltico (ϵ_t) e vertical no topo do subleito (ϵ_v) e das solicitações admissíveis utilizando as equações listadas na Tabela 1. Cabe ressaltar que para cada solo utilizou-se no AEMC seu comportamento não linear caracterizado nos ensaios de MR em cada condição de umidade, utilizando valores de k_1 , k_2 e k_3 obtidos experimentalmente (Tabela 5).

Tabela 6. Pavimento de referência: Resultado da análise tensão-deformação dos subleitos.

Solo	w (%)	D (10^{-2} mm)	ϵ_t (10^{-4})	ϵ_v (10^{-4})	N_{tr}	N_{ir}	N_{sub}
Solo 1	4,37	39,8	2,71	3,79	$1,03 \times 10^8$	$3,68 \times 10^6$	$1,19 \times 10^7$
	5,88	38,0	2,52	3,76	$1,34 \times 10^8$	$4,75 \times 10^6$	$2,24 \times 10^7$
	8,51	42,8	2,98	3,81	$6,80 \times 10^8$	$2,63 \times 10^6$	$1,16 \times 10^7$
Solo 2	9,43	37,7	2,47	3,75	$1,40 \times 10^8$	$5,09 \times 10^6$	$1,25 \times 10^7$
	11,02	37,5	2,47	3,74	$1,44 \times 10^8$	$5,09 \times 10^6$	$1,27 \times 10^7$
	12,53	46,1	3,23	3,78	$4,46 \times 10^7$	$1,99 \times 10^6$	$1,21 \times 10^7$
Solo 3	4,73	37,6	1,64	1,64	$1,42 \times 10^8$	$2,15 \times 10^6$	$6,43 \times 10^8$
	6,43	40,5	2,77	3,80	$9,31 \times 10^7$	$3,41 \times 10^6$	$1,18 \times 10^7$
	8,47	46,6	3,26	3,77	$4,20 \times 10^7$	$1,90 \times 10^6$	$1,22 \times 10^7$

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6, obtidos das análises tensão-deformação do pavimento de referência, observa-se que os três solos avaliados, o N_{adm} (N_{tr} , N_{ir} , N_{sub}) sofreu variação



DOI: [10.29327/1430212.49-48](https://doi.org/10.29327/1430212.49-48)

INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE TRÊS MATERIAIS GRANULARES NÃO LATERÍTCOS

com a alteração da umidade de compactação. Considerando-se que em pavimentos asfálticos flexíveis a deformação de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t) é a resposta elástica que proporciona os maiores impactos na expectativa de vida útil, no Solo 1, de umidade ótima de 7,19% (Tabela 3) duas umidades ensaiadas ficaram 1,31% abaixo e 1,32% acima da ótima, culminando com o maior valor de Nir para a umidade abaixo da ótima ($4,75 \times 10^6$), com redução de 45% deste parâmetro na umidade acima da ótima ($2,63 \times 10^6$).

O Solo 2, cuja umidade ótima é de 10,55% (Tabela 3), apresentou grande variação de ϵ_t quando compactado em diferentes umidades, com $2,47 \times 10^{-4}$, nas umidades, cerca de 0,5% acima e 1% abaixo da ótima (11,02% e 9,43%), para $3,23 \times 10^{-4}$ na umidade cerca de 2% acima da ótima (12,53%). Dessa forma, o Nir estimado deste solo variou de $5,09 \times 10^6$ para $1,99 \times 10^6$, respectivamente, correspondendo a uma redução de aproximadamente de 61%.

Por fim, o Solo 3, de umidade ótima de 6,65%, foi o único em que um dos pontos ensaiados foi praticamente coincidente com a umidade ótima (6,43%). Para este solo o ponto ensaiado 1,92% abaixo da ótima (4,73%) foi o que apresentou o maior valor de Nir ($5,09 \times 10^6$), com queda no valor deste parâmetro com aumento da umidade para 6,43% e 8,43%, de 33% e 63%, respectivamente, sendo este solo o que apresentou maior variação percentual de Nir entre os materiais testados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram caracterizados materiais provenientes do revestimento primário da BR 030. Esses materiais tiveram sua fração fina classificada como de comportamento não laterítico e foram classificados como granular com finos (Gf) e solo com pedregulho (Sp). Ao se avaliar o efeito da umidade de compactação no comportamento resiliente desses materiais, observaram-se respostas diferentes no ensaio de Módulo de Resiliência desses materiais em função das suas características. Além disso, observou-se que a influência das tensões desvio e confinante também sofrem influência do material e da umidade de compactação. O material com maior teor de finos sofre maior variação do MR com as tensões desvio (σ_d), enquanto os materiais com menor teor de finos dependem mais da tensão confinante (σ_3). Em termos da relação entre umidade de compactação e módulo de resiliência, observa-se que a condição de maior rigidez varia entre os materiais.

As análises tensão-deformação indicaram que variações de umidade de compactação, mesmo abaixo de 2% em relação ao teor de umidade ótimo do solo, pode ocasionar reduções significativas na expectativa de vida útil dos pavimentos asfálticos, com risco de ocorrência precoce de patologias, sobretudo aquelas relacionadas ao fenômeno de fadiga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6458 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 2 ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. 10 p.
- Bastos, J. B. S. Influência da variação da umidade no comportamento de Pavimentos da região metropolitana de Fortaleza. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia de Transporte, Universidade do Ceará, 2013.
- Carvalho, A. I. S.; Almeida, M. S. de S.; Pedreira, W. J. P.; Costa, W. G. S.; São Mateus, M. do S. C. Influência da Densificação do Solo de Subleito no Desempenho de Pavimentos Flexíveis. Anuário do Instituto de Geociências, [S.L.], v. 43, n. 4, p. 253-262, 18 dez. 2020. Instituto de Geociências - UFRJ.
- Confederação Nacional dos Transportes (CNT) Anuário CNT do Transporte 2022. Anuário CNT do transporte 2022. Disponível em <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/>. Acesso em: 10 setembro de 2023.



Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. DER-SP - Projeto de Pavimentação. IP- DE-P00/001. São Paulo, 53 p., 2006.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 258 - Solos - Compactação em equipamento miniatura - Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. 2023a.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 443 ME - Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos. Brasília-DF, 12 p. 2023b.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 444 - Classificação de solos tropicais de granulação grossa - Classificação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. 2023c.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 051 - Solos - Análise granulométrica. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. 1994a.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 082 - Solos - determinação do limite de plasticidade. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. 1994b.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 122 - Solos-determinação do limite de liquidez - método de referência e método expedito. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. 1994c.

Freitas, J. B. de; Rezende, L. R. de; Gitirana Jr., G. de F. N. Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. *Engineering Geology*. V. 270, p. 105580. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105580>.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico – empírico de dimensionamento de pavimento asfáltico. Manual de Utilização do programa MeDiNa. COPPE/UFRJ. 2020. Disponível em < <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-epesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf>>. Acesso em: 30 de maio de 2024.

Kern, C. Análise de desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto no Rio Grande do Sul: a avaliação de um pavimento submetido à oscilação do lençol freático. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2017.

Levay, V. S. Influência do teor de umidade no módulo de resiliência de solos da BR-319/AM e BR-156/AP para aplicabilidade em pavimentação. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. 2023.

Santos, E. F. Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

SANTOS, I. J. *et al.* Caracterização resiliente de solos oriundos de diferentes regiões do estado da Bahia para uso em subleito rodoviário. In: Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2022, Fortaleza. Anais eletrônicos [...] Campinas, Galoá, 2022.

Takeda, M. C. A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulistas. Tese de Doutorado, Curso de Engenharia civil, Universidade de São Paulo, p. 13. 2006.

Villibor, D. F.; Alves, D. M. L. Pavimentação de Baixo Custo para Regiões Tropicais: projeto e construção - novas considerações. Florianópolis: Tribo da Ilha. 2019.



COMPORTAMENTO RESILIENTE DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO PAVIMENTO DO AEROPORTO DE DOURADOS/MS

Camila Antunes Martins¹; Luisa Carla de Alencar Menezes¹; Ana Carolina Duarte Bona¹; Priscila Oliveira Folly¹; Antônio Carlos Rodrigues Guimarães¹

RESUMO

Os aeroportos desempenham um papel fundamental no fortalecimento da economia de um país, sendo essenciais para o comércio internacional, turismo e investimentos. O pavimento aeroportuário deve apresentar desempenho estrutural adequado às demandas operacionais, assegurando uma superfície capaz de suportar as atividades aeroportuárias e conferir segurança e conforto aos usuários. A integração dos princípios da mecânica dos pavimentos no projeto e dimensionamento tem se tornado cada vez mais comum, permitindo uma previsão mais precisa do comportamento das diferentes camadas do pavimento diante das tensões e deformações às quais são submetidas. Este estudo visa analisar o comportamento resiliente do solo do subleito no aeroporto regional de Dourados/MS, com o objetivo de avaliar sua viabilidade para uso. A caracterização dos solos revelou características típicas de solos tropicais, indicando sua adequação para as condições locais. Os ensaios realizados no equipamento triaxial dinâmico para determinação do Módulo de Resiliência (MR) demonstraram que o solo possui valores médios que o qualificam como um material apropriado para o emprego como material de subleito do aeroporto de Dourados. Verifica-se, também, que a determinação do MR dos materiais empregados nas camadas dos pavimentos pode contribuir significativamente para a melhoria da infraestrutura aeroportuária, aumentando assim a eficiência e durabilidade da rede de aeroportos da região.

PALAVRAS-CHAVE: Módulo de Resiliência; Pavimento Aeroportuário; Solo Fino Laterítico.

ABSTRACT

Airports play a fundamental role in strengthening a country's economy, being essential for international trade, tourism, and investments. Airport pavement must exhibit adequate structural performance to meet operational demands, ensuring a surface capable of supporting airport activities while providing safety and comfort to users. The integration of pavement mechanics principles into design and dimensioning has become increasingly common, allowing for a more precise prediction of the behavior of different pavement layers under the stresses and deformations they are subjected to. This study aims to analyze the resilient behavior of subgrade soil at the regional airport of Dourados/MS, with the goal of evaluating its suitability for use. Soil characterization has revealed typical characteristics of tropical soils, indicating its suitability for local conditions. Tests conducted on the dynamic triaxial equipment to determine the Resilience Module (MR) have shown that the soil has average values qualifying it as an appropriate material for use as subgrade at the Dourados airport. It is also evident that determining the MR of materials used in pavement layers can significantly contribute to the improvement of airport infrastructure, thereby enhancing the efficiency and durability of the airport network in the region.

KEY WORDS: Resilient Modulus; Airport Pavement; Lateritic Fine Soil.

¹ Instituto Militar de Engenharia, camilaantunes@ime.eb.br; luisacarlaam@hotmail.com; anabona@ime.eb.br; priscilafolly123@gmail.com; guimaraes@ime.eb.br.

INTRODUÇÃO

Os aeroportos desempenham um papel crucial no fortalecimento da economia nacional, impulsionando o comércio internacional, o turismo e os investimentos. Segundo dados da Agência Nacional de Aviação Civil, o setor aéreo brasileiro registrou um aumento significativo de



Camila Antunes Martins,
Luisa Carla de Alencar Menezes,
Ana Carolina Duarte Bona,
Priscila Oliveira Folly,
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

aproximadamente 15% no número de passageiros em 2023 em comparação com o ano anterior, alcançando a marca de 112 milhões de passageiros (ANAC, 2023).

A gestão aeroportuária demanda investimentos substanciais em infraestrutura, especialmente na construção e manutenção de pavimentos, cuja qualidade e conservação desempenham um papel fundamental na prevenção de possíveis acidentes aéreos decorrentes de irregularidades excessivas. Entretanto, é comum que os recursos financeiros disponíveis para essa manutenção sejam insuficientes diante das demandas identificadas (SHAHIN, 2005).

Diante dessa realidade, onde a condição dos pavimentos nos aeroportos é crucial para garantir a segurança e o conforto durante as viagens aéreas, torna-se evidente a necessidade de investimentos e pesquisas voltadas para a melhoria da qualidade desses pavimentos no Brasil. Esses esforços são essenciais para o avanço do país, podendo resultar na construção de novos pavimentos com durabilidade e desempenho otimizados, contribuindo para um sistema aeroportuário mais eficiente e competitivo.

A fase de projeto e dimensionamento desempenha um papel fundamental na garantia de uma longa vida útil para os pavimentos, minimizando a necessidade de intervenções de manutenção, como destacado por Spada (2003). Portanto, é necessário empregar métodos de dimensionamento que considerem o comportamento real das camadas geotécnicas, como os ensaios de módulo de resiliência para solos e camadas granulares.

Medina e Motta (2005) enfatizam a importância do sublastro na qualidade da via para a operação segura e confortável dos veículos ferroviários. Durante a fase de projeto, é essencial melhorar o sublastro ou buscar materiais que possam corresponder melhor à capacidade de carga da via, pois o sublastro é de difícil acesso para reparos posteriores.

No que diz respeito às camadas do pavimento aeroportuário, o comportamento mecânico da camada de sublastro é de suma importância, devendo apresentar rigidez e capacidade de suporte adequadas para resistir às tensões provocadas pelo tráfego de aeronaves, sem deformações plásticas excessivas que possam comprometer a integridade estrutural do pavimento.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar o comportamento resiliente do solo proveniente do subleito do Aeroporto Regional de Dourados/MS. Para isso, foram realizados ensaios no equipamento triaxial dinâmico para determinação do Módulo de Resiliência (MR).

PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO

O pavimento é uma construção que sucede a etapa de preparação do solo e tem como principal propósito resistir e distribuir as cargas verticais geradas pelo tráfego, melhorando as condições de rolamento para assegurar segurança e conforto, além de suportar as cargas horizontais, garantindo uma superfície durável para a circulação (NBR 7207, 1982).

No contexto aeroportuário, o pavimento assume uma importância ainda maior devido às demandas específicas do tráfego de aeronaves. Os pavimentos de aeroportos devem ser projetados para suportar cargas excepcionalmente pesadas, como as geradas por aeronaves de grande porte durante as fases de decolagem e pouso. Além disso, eles devem garantir condições de segurança para as operações



DOI: 10.29327/1430212.49-49

COMPORTAMENTO RESILIENTE DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO
PAVIMENTO DO AEROPORTO DE DOURADOS/MS

aeroportuárias, incluindo resistência ao deslizamento e eficiente drenagem para prevenir a formação de poças de água que possam comprometer a aderência dos pneus das aeronaves.

A complexidade do pavimento aeroportuário demanda considerações técnicas detalhadas, desde a seleção de materiais adequados até um dimensionamento estrutural preciso, além da necessidade de manutenção regular para preservar a integridade da superfície de rolamento ao longo do tempo. No que diz respeito à escolha dos materiais, Guimarães (2009) destaca que as propriedades mecânicas dos materiais utilizados nas diversas camadas dos pavimentos, como o Módulo de Resiliência (MR), são influenciadas por uma série de fatores. Isso inclui a condição de carregamento e o estado de tensão a que estão sujeitos, a natureza do solo, que envolve sua origem, composição e estrutura, e o estado físico do solo, que é determinado pelo teor de umidade e pela massa específica seca.

Módulo de Resiliência

Entende-se por resiliência a capacidade de um material retornar à sua forma e posição original após o cessar do carregamento (KLINCEVICIUS, 2011). O módulo de resiliência, portanto, é uma das propriedades mecânicas que influenciam o desempenho dos materiais a serem utilizados nas camadas do pavimento.

Dessa forma, o emprego do módulo de resiliência (MR) é um dos principais parâmetros na definição da qualidade dos materiais que serão aplicados na construção de pavimentos, sobretudo a característica resiliente do material que constitui o subleito.

A aplicação de carga durante o ensaio é de um pulso com um tempo de duração de 0,1 segundo de carregamento e repouso de 0,9 segundo. O procedimento decorre da aplicação de dezoito pares de tensões, onde a tensão confinante (σ_3) é dada pela pressão de ar dentro da câmara e tensão solicitante (σ_1) por célula de carga, conforme exemplificado na Figura 1.

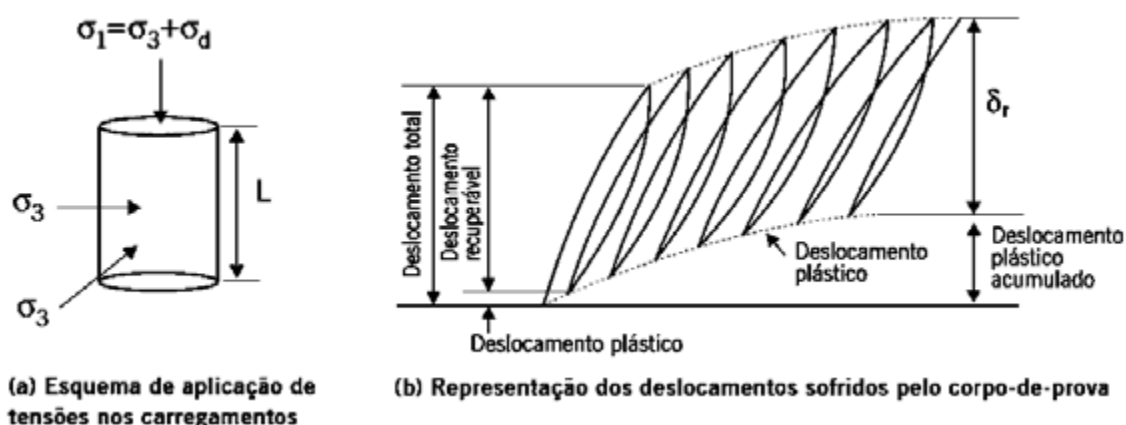


Figura 1. Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio de carga repetida (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Assim, ao se aplicar a Lei de Hooke generalizada, o módulo de resiliência pode ser calculado pela razão entre as tensões transientes verticais e a deformação recuperável, conforme é dado pela Equação 1.



Camila Antunes Martins,
Luisa Carla de Alencar Menezes,
Ana Carolina Duarte Bona,
Priscila Oliveira Folly,
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão desvio aplicada repetidamente no eixo axial;

ε_r = deformação específica axial resiliente (recuperável), mm/mm. Sendo: $\varepsilon_r = \delta_r/L$, isto é, deslocamento recuperável (δ_r) pela altura ou espessura (L) do corpo-de-prova submetido às tensões.

Dessa forma, o Módulo de Resiliência (MR) é representado na forma de modelos matemáticos que buscam correlações empíricas entre o valor obtido com o estado de tensões aplicadas. Dentre os fatores que afetam o módulo de resiliência do solo, indicam-se a constituição mineralógica, textura e plasticidade do solo, umidade, grau de saturação, densidade e estado de tensões (GOMES, 2018).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente estudo foi analisando um solo proveniente do subleito do Aeroporto Regional de Dourados, localizado no município de Dourados/MS. Durante a coleta pode-se observar o aspecto argiloso e fino do material de acordo com o exposto na Figura 2.



Figura 2. Solo laterítico em seu local de origem no aeroporto de Dourados/MS.

Após a coleta das amostras a parti, procedeu-se à realização de ensaios de caracterização no Laboratório de Solos do Instituto Militar de Engenharia, situado no Rio de Janeiro/RJ. Foram conduzidos os seguintes ensaios: análise granulométrica (DNER-ME 051/94), classificação MCT (DNER-ME 256/94 e DNER-ME 258/94), determinação da densidade real (DNER-ME 084/95), e dos limites de liquidez e plasticidade (DNER-ME 122/94 e DNER-ME 082/94, respectivamente). Os resultados desses ensaios estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do solo estudado.

Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Densidade Real (g/cm ³)	Umidade Ótima (%)	MEAS (g/cm ³)	Classificação MCT
51,30	31,00	2,77	27,40	1,60	LG'

No que diz respeito à granulometria do solo estudado, observa-se presença majoritária de argila sendo está de 69%, 31% de silte e 1% para areia fina (Figura 3).



DOI: 10.29327/1430212.49-49

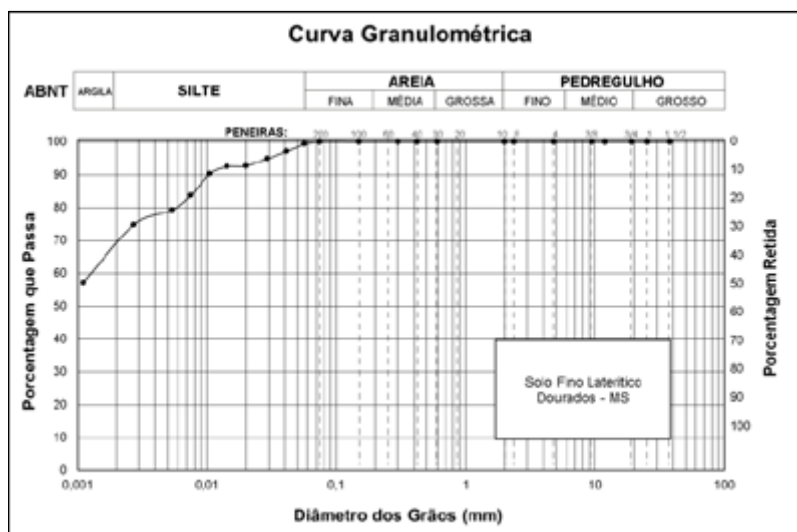
COMPORTAMENTO RESILIENTE DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO
PAVIMENTO DO AEROPORTO DE DOURADOS/MS

Figura 3. Granulometria por peneiramento e sedimentação do solo.

Após realizada a caracterização granulométrica do material, procedeu-se a utilização do equipamento triaxial de cargas repetidas para a realização dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR). O ensaio para determinação do MR foi realizado em concordância com a norma DNIT 134/2018 – ME. Foram adotados corpos de prova com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e estes foram compactados na energia Proctor Modificada. Os pares de tensões aplicados neste estudo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Tensões empregadas nos ensaios.

Ciclo	Tensão Confinante (MPa)	Tensão Desvio (MPa)
1	0,021	0,022
2	0,021	0,041
3	0,021	0,062
1	0,035	0,036
2	0,035	0,072
3	0,035	0,107
1	0,050	0,052
2	0,050	0,102
3	0,050	0,151
1	0,070	0,072
2	0,070	0,141
3	0,070	0,215
1	0,105	0,107
2	0,105	0,219
3	0,105	0,334
1	0,139	0,142
2	0,139	0,295



Camila Antunes Martins,
Luisa Carla de Alencar Menezes,
Ana Carolina Duarte Bona,
Priscila Oliveira Folly,
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

Ciclo	Tensão Confinante (MPa)	Tensão Desvio (MPa)
3	0,139	0,442

A análise do comportamento resiliente foram realizadas com base nos modelos para obtenção do Módulo de Resiliência (MR) apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Modelos de enquadramento do MR utilizados no presente trabalho.

Modelos	Autores
$Mr = k_1 \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{k_2}$	DUNLAP (1963)
$Mr = k_1 \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} \right)^{k_2}$	SEED <i>et al.</i> , (1967)
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3}$	UZAN (1985)
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3}$	WITCZAK e UZAN (1988)
$Mr = k_1 \left(\frac{\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1}{\tau_{oct}} \right)^{k_2}$	JOHNSON <i>et al.</i> , (1986)
$Mr = k_1 \left(\frac{\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right)}{\sigma_d} \right)^{k_2}$	TAM e BROWN (1988)
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3}$	PEZO (1993)
$Mr = k_1 \left(\frac{\sigma_3}{P_a} + 1 \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$	HOPKINS <i>et al.</i> , (2001)
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} + 1 \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$	NI <i>et al.</i> , (2002)
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} + 1 \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$	NCHRP1-37A (2004)
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$	NCHRP1-28A (2004)
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} + 1 \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$	OOI <i>et al.</i> , (2004)



DOI: 10.29327/1430212.49-49

COMPORTAMENTO RESILIENTE DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO
PAVIMENTO DO AEROPORTO DE DOURADOS/MS**RESULTADOS E DISCUSSÕES**

O módulo de resiliência, uma propriedade mecânica do solo obtida por meio de ensaios triaxiais de carga repetida, serve para avaliar sua rigidez. Para o solo laterítico investigado neste estudo, os resultados do Módulo de Resiliência variaram de 156 a 258 MPa, conforme detalhado na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados do módulo de resiliência do solo laterítico estudado.

Ciclo	Tensão Confinante (MPa)	Tensão Desvio (MPa)	Módulo Resiliente (MPa)
1	0,021	0,022	157,6
2	0,021	0,041	156,3
3	0,021	0,062	156,4
1	0,035	0,037	179,1
2	0,035	0,072	181,7
3	0,035	0,107	181,0
1	0,050	0,052	199,3
2	0,050	0,102	197,4
3	0,050	0,151	195,4
1	0,070	0,072	216,6
2	0,070	0,141	213,0
3	0,070	0,215	210,4
1	0,105	0,107	236,0
2	0,105	0,219	234,2
3	0,105	0,334	239,2
1	0,140	0,142	258,9
2	0,140	0,295	256,8
3	0,140	0,442	247,6

A Figura 4 exibe o gráfico representando a distribuição dos módulos de resiliência obtidos no ensaio em relação à tensão desvio e à tensão confinante.

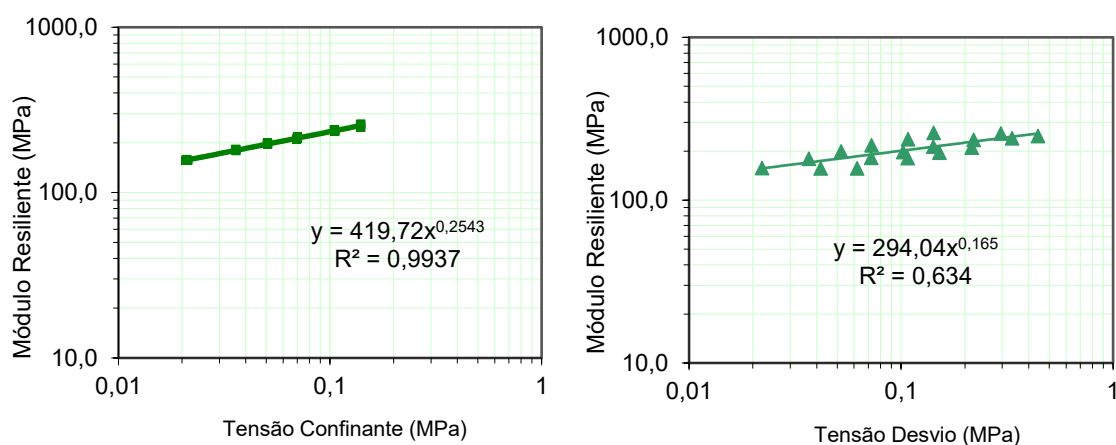


Figura 4. Módulos de resiliência obtidos no ensaio em função da tensão desvio e da tensão confinante para o solo laterítico.



Camila Antunes Martins,
Luisa Carla de Alencar Menezes,
Ana Carolina Duarte Bona,
Priscila Oliveira Folly,
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

Nota-se um alto coeficiente de correlação (R^2) de 0,9952 para o gráfico em relação à tensão confinante, indicando que o material possui características finas, como evidenciado no ensaio de granulometria. Além disso, foram realizadas análises do módulo de resiliência em outros modelos encontrados na literatura, os quais estão detalhados na Tabela 12 e foram analisados usando o programa STATISTICA. O objetivo dessa análise foi determinar qual modelo melhor representa o comportamento resiliente do material.

Percebe-se, por meio dos dados apresentados na Tabela 5, um excelente resultado para todos os modelos cujos valores de R^2 foram superiores a 0,95. Resultado bem superior em relação aos calculados para os modelos de MR em função apenas da tensão confinante, como apresentado na Figura 4.

Tabela 5. Resultado dos modelos de enquadramento do MR.

Modelos	Autores	(R^2)	Constantes de Regressão
$Mr = k_1 \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{k_2}$	DUNLAP (1963)	0,9968	$k_1 = 233,677$ $k_2 = 0,2337$
$Mr = k_1 \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} \right)^{k_2}$	SEED <i>et al.</i> , (1967)	0,9529	$k_1 = 159,682$ $k_2 = 0,2107$
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3}$	UZAN (1985)	0,9963	$k_1 = 1,3210$ $k_2 = 0,4197$ $k_3 = -0,1674$
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3}$	WITCZAK UZAN (1988)	e 0,9963	$k_1 = 1,1646$ $k_2 = 0,4197$ $k_3 = -0,1674$
$Mr = k_1 \left(\frac{\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1}{\tau_{oct}} \right)^{k_2}$	JOHNSON <i>et al.</i> , (1986)	0,9540	$k_1 = 49,967$ $k_2 = 0,2296$
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3}$	PEZO (1993)	0,9975	$k_1 = 2,3559$ $k_2 = 0,2669$ $k_3 = -0,0129$
$Mr = k_1 \left(\frac{\sigma_3}{P_a} + 1 \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$	HOPKINS <i>et al.</i> , (2001)	0,9829	$k_1 = 147,254$ $k_2 = 0,6789$ $k_3 = -0,02056$
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} + 1 \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$	NI <i>et al.</i> , (2002)	0,9829	$k_1 = 1,4725$ $k_2 = 0,6789$ $k_3 = -0,02056$
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} + 1 \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$	NCHRP1-37A (2004)	0,9949	$k_1 = 1,1612$ $k_2 = 0,5402$ $k_3 = -0,4077$



DOI: 10.29327/1430212.49-49

COMPORTAMENTO RESILIENTE DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO
PAVIMENTO DO AEROPORTO DE DOURADOS/MS

$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$	NCHRP1-28A (2004)	0,9921	$k_1 = 1,6607$ $k_2 = 0,58251$ $k_3 = -0,2550$
$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_{sum}}{P_a} + 1 \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$	OOI <i>et al.</i> , (2004)	0,9957	$k_1 = 1,1891$ $k_2 = 0,05589$ $k_3 = -3056$

Comparando com outros valores de MR encontrados na literatura, o solo laterítico estudado nesta pesquisa mostra valores similares aos relatados por Souza (2021) e Almeida (2022), mas inferiores aos apresentados por Sanchez (2021), conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6. Valores de MR encontrados na literatura.

Autores	Módulo de resiliência (Mpa)
SOUZA (2021)	145 - 205
ALMEIDA (2022)	167,33
SANCHEZ (2021)	288

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos ensaios realizados no equipamento triaxial de cargas repetidas, foi possível verificar que o material proveniente do subleito do pavimento do aeroporto regional de Dourados apresentou Módulo de Resiliência variando entre 156 e 258 MPa. Esses valores apresentam consistência com a faixa apresentada por Gomes *et al.* (2018), que varia entre 153 e 536 MPa. Esse resultado também está em conformidade com os valores encontrados para esse solo em estudos anteriores conduzidos por Guimarães (2009) e Lima (2020) e evidencia a boa resposta elástica do material.

A análise dos MRs obtidos por modelos distintos existentes na literatura permitiu constatar que a tensão confinante exprime influência significativa para um enquadramento próximo a 1, diferente de modelos sem a tensão citada acima ou com ela em segundo plano.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo suporte fornecido para a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC (2023). Anuário do Transporte Aéreo. 153 p. Brasília. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/panorama-do-mercado/anuario-transporte-aereo>. Estudo Transporte e Economia – Transporte Aéreo de Passageiros.
- ALMEIDA, B. D. Influência da adição de areia no comportamento mecânico de base de solo pedregulhoso laterítico – Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2022.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1982). NBR 7207: Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro.



Camila Antunes Martins,
Luisa Carla de Alencar Menezes,
Ana Carolina Duarte Bona,
Priscila Oliveira Folly,
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G. da.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B (2008). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 1. ed. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 504 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1994). DNER-ME 051: Solos – análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1994). DNER-ME 082: Solos – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1995). DNER-ME 084: Agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1994). DNER-ME 122: Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1994). DNER-ME 256: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1994). DNER-ME 258: Solos compactados com equipamento miniatura – mini-MCV. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNIT (2018). DNIT 134-ME: Pavimentação –Solos –Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro.
- GOMES, M. S.; GUIMARÃES, A. C. R.; MARQUES, M. E. S. Estudo da influência do tipo de finos no comportamento resiliente de solos tropicais para uso em pavimentos. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais. v.9, n.5, p.78-87.
- Guimarães, A. C. R (2009). Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. 367 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos pavimentos. 2 ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.
- KLINCEVICIUS, M. G. Y. Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários. 156 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- Shahin, M. Y. (2005). *Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots*. 2ª Ed. Chapman & Hall, New York, USA.
- SOUSA, M. A. da S. Contribuição ao estudo de solos tropicais para uso na pavimentação rodoviária. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.
- SPADA, J. L. G. Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea. Tese (Doutorado em ciências em engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003, 200 p.



Estudo do comportamento mecânico esperado de solos tropicais de granulometria transicional

Rafael Lopes Witiuk¹; Maria Esther Soares Marques¹; Antonio Carlos Rodrigues Guimarães¹

RESUMO

Em virtude da crescente demanda por transporte de carga e da escassez de infraestruturas para o seu escoamento no contexto nacional, tem-se a expectativa de investimentos em ferrovias, principalmente voltados ao escoamento das *comodities*. Ademais, tendo em vista o elevado impacto ambiental relacionado a execução desse tipo de obra e a escassez de recursos disponíveis, o aproveitamento de jazidas locais para pavimentação e terraplenagem são desejáveis. No entanto, os métodos de classificação de solos disponíveis não possibilitam enquadrar um grupo de materiais finos com menos de 90% de passantes na peneira nº10, bem como não viabilizam a utilização devido à granulometria fina e baixa resistência a penetração em geral apresentada frente a brita padrão da Califórnia. Esses grupo de solos são chamados neste estudo de Solos de Granulometria Transicional (SGT) e, para avaliar a possibilidade de seu uso em pavimentação, foi realizado um estudo de sua caracterização física e mecânica. A partir deste estudo pode-se verificar que o comportamento mecânico dos SGT atendeu aos critérios de aceitação para emprego como camada de sublastro, com tensão admissível de 161 kPa pela equação de Heukelom e apresentando acomodamento aos 150.000 ciclos de aplicação de carga nos ensaios triaxiais de carga repetida.

PALAVRAS-CHAVE: Solos tropicais, sublastro, classificação de solos.

ABSTRACT

Due to the increasing demand for freight transportation and the scarcity of infrastructure for its flow in the national context, there is an expectation of investments in railways, mainly aimed at the transportation of commodities. Furthermore, considering the high environmental impact associated with the execution of this type of project and the scarcity of available resources, the utilization of local deposits for paving and earthwork is desirable. However, the available soil classification methods do not allow for the classification of a group of fine materials with less than 90% passing through the No. 10 sieve, nor do they enable their use due to their fine grain size and low penetration resistance compared to standard California aggregate. This group of soils is referred to in this study as Transitional Granulometry Soils (SGT), and to assess the possibility of their use in paving, a study of their physical and mechanical characterization was conducted. From this study, it was observed that the mechanical behavior of SGT met the acceptance criteria for use as a subbase layer, with an allowable stress of 161 kPa by the Heukelom equation and showing accommodation to 150,000 cycles of load application in repeated triaxial load tests.

KEY WORDS: Tropical soils, Subballast, Soil classification.

¹ Instituto Militar de Engenharia, rlwitiuk@ime.eb.br, esther@ime.eb.br; guimaraes@ime.eb.br

INTRODUÇÃO

Dentre os principais desafios do setor de transportes brasileiro, tem-se a necessidade de atendimento à elevada e crescente demanda da movimentação de granéis no interior do país. A maior parte desta produção é destinada para a exportação e se encontra no interior do país, devendo ser escoada para os portos. Nestas condições, o transporte ferroviário apresenta melhores condições de atendimento a demanda, motivando o desenvolvimento de investimentos em projetos de ampliação deste modo de transporte.



O custo de projetos de infraestruturas lineares, especialmente do tipo ferroviário depende de estudos acerca dos materiais disponíveis na região para obras de terraplenagem e pavimentação. Neste sentido, os sistemas de classificação dos materiais são de grande importância para a aprovação dos solos disponíveis para composição dos aterros e, principalmente, na seleção de jazidas locais para uso como sublastro.

O emprego de solos locais para pavimentação se faz especialmente importante em regiões como a hinterlândia brasileira, em que predomina a ocorrência de solos arenosos lateríticos finos (SALF) com pouca disponibilidade de materiais pétreos. Assim, os materiais locais, em função principalmente do valor do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e de sua granulometria não são aceitos pelos métodos de classificação tradicionais, tais quais o *Transportation Research Board* (TRB) e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). O que demonstra a importância do uso de metodologias específicas para a seleção de solos tropicais, como a sistemática Miniatura-Compactada-Tropical (MCT), que pode reduzir o custo e o impacto ambiental da obra.

Entretanto, frequentemente são identificados em campo solos lateríticos com granulometria incompatível para o uso da metodologia MCT, por apresentarem menos de 90% de passantes na peneira nº10. Nesta perspectiva, o presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento mecânico de solos obtidos em regiões de projetos de ampliação de ferrovias que não podem ser classificados pelo MCT e não atendem aos critérios de seleção tradicionais para pavimentação. Estes materiais são chamados neste trabalho de Solos de Granulometria Transicional (SGT).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Classificação de solos tropicais

Nogami & Vilibor (2009) evidenciaram a necessidade de se conhecer as propriedades dos solos tropicais brasileiros para o desenvolvimento de projetos de infraestrutura em território nacional. Para eles, os métodos tradicionalmente utilizados na seleção dos solos para pavimentação, oriundos do método do índice de suporte Califórnia (ISC) e da classificação TRB de 1930, não são adequados para caracterização dos solos tropicais uma vez que se fundamentam em critérios de granulometria e de resistência à penetração. Desse modo, não levam em conta as propriedades dos solos finos tropicais, especialmente associados ao seu comportamento laterítico.

O comportamento laterítico dos solos tropicais está associado à hidrólise total da sílica e total ou parcial do potássio, bem como pela formação de óxidos de ferro e alumínio que atuam como cimentantes naturais quando compactados na umidade ótima. O processo de formação destes solos está associado à elevadas taxas pluviométricas e às elevadas temperaturas médias das regiões tropicais que predominam no território nacional (CAVALCANTE *et al*, 2016).

Em decorrência da limitação dos sistemas de classificação tradicionais, e as características experimentais promissoras dos solos lateríticos para pavimentação, em 1974 o DER-SP utilizou as diretrizes defendidas por Vilibor (1974) em sua dissertação de mestrado para estabelecer as primeiras normativas para projetos de pavimentos com uso de bases SALF. Já em 1981 foi apresentada a sistemática MCT como resultado da tese de doutoramento de Job Nogami, em que foram apresentados os ensaios que permitiram a classificação dos materiais de comportamento laterítico para utilização em projetos de pavimentação.

DOI: [10.29327/1430212.49-46](https://doi.org/10.29327/1430212.49-46)ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO ESPERADO
DE SOLOS TROPICAIS DE GRANULOMETRIA TRANSICIONAL**Seleção de materiais para pavimentação**

Para obras de pavimentação ferroviária no Brasil atualmente é utilizada a Instrução de Serviço Ferroviário (ISF) 212 - Projeto de Superestrutura da Via Permanente - Lastro e Sublastro elaborado pelo DNIT (2015). Na Tabela 1 estão apresentados os critérios para seleção de material de sublastro.

Tabela 1. Critérios de seleção de materiais para aplicação como sublastro (DNIT, 2015)

Parâmetro	Sublastro
Limite de Liquidez (LL)	≤ 25,0%
Índice de Plasticidade (IP)	≤ 6,0%
Fração de passantes na peneira nº200	≥ 2,0% e ≤ 25,0%
Índice de Suporte Califórnia	>20,0%
Expansão	<1,0%
Fração passante na peneira nº200	<2/3 passantes na nº40
Para solos Lateríticos - Expansão	<0,5%
Para solos Lateríticos - Limite de Liquidez (LL)	≤ 40,0%
Para solos Lateríticos - Índice de Plasticidade (IP)	≤ 15,0%
Índice de Grupo (IG)	0

Pode-se observar que as premissas de seleção de materiais apresentados na norma são baseadas em critérios de granulometria, expansão e de índice de suporte Califórnia, que decorrem dos métodos de classificação tradicionais. Em alternativa à esta abordagem a metodologia MCT parte de critérios de perda por imersão e compactação para estimar o comportamento laterítico e a granulometria do solo afim de enquadrá-lo em 6 categorias de solo. Assim, a classificação MCT é dividida em materiais de comportamento laterítico (LA, LA' e LG') e não laterítico (NA, NA', NS' e NG'), subdivididos conforme a sua granulometria, em argilas, siltes e areias, bem como os diversos arranjos granulométricos intermediários. As propriedades das tipologias de solos classificados pelo MCT estão apresentadas na Tabela 2.

No entanto, a classificação apresentada na Tabela 2 limita-se a seleção de materiais de pavimentação com 90% de passantes na peneira nº10, ou seja, é aplicável apenas para solos finos.

No que se refere especificamente a camada de sublastro, tem-se que esta deverá suportar a tensão total vertical nela atuante, que pode ser estimada a partir da Equação 1 proposta por Heukelon e Klomp (1962). Para esta estimativa são necessários os dados de módulo de resiliência da camada do pavimento em função do seu estado de tensões quando solicitado pela composição ferroviária, bem como número N, que exprime a quantidade de eixos que irão trafegar na via ao longo da vida útil da infraestrutura em questão.

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006 \cdot MR}{1+0,7 \cdot \log N} \quad (1)$$

Estudos realizados por Lopes (2017), Rosa (2019) e Indaratna (2011), evidenciaram que a camada de sublastro usualmente está sujeita à tensões máximas verticais simuladas e aferidas *insitu* da ordem de 120 kPa a 150 kPa.



Tabela 2. Propriedade e utilização de solos pela classificação MCT (Viliber & Alves, 2017)

Designação			Granulometrias típicas designação do T1-71 do DER-SP							
k=caulinítico m=micáceo s=serícítico q=quartzoso			Areias	Areias	Siltos	Argilas	Areias	Areias	Argilas	Argilas
			Siltos (q,s)	Siltosas	(k,m)	arenosas	argilosas	argilosas	Siltos	argilosas
Comportamento			N = Não Laterítico L=Laterítico							
Grupo MCT			NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'	
Propriedades	Mini-CBR	sem imersão	M,E	E	M,E	E	E	E,EE	E	
		perda por imersão	B,M	B	E	E	B	B	B	
	Expansão (%)		B	B	E	E	B	B	B	
	Contração (Ct)		B	B,M	M	M	B	B,M	M,E	
	Coef. De Permeabilidade (k)		M,E	B	B,M	B,M	B,M	B	B	
	Coef. De Sorção (s)		E	B,M	E	M,E	B	B	B	
	Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal			EE=Muito elevado E=Elevado M=Médio B=Baixo						
Utilização *	Base de pavimento		n	4º	n	n	2º	1º	3º	
	Reforça do subleito compactado		4º	5º	n	n	2º	1º	3º	
	Subleito Compactado		4º	5º	7º	6º	2º	1º	3º	
	Aterro (corpo) compactado		4º	5º	6º	7º	2º	1º	3º	
	Proteção à erosão		n	3º	n	n	n	2º	1º	
	Revestimento primário		5º	3º	n	n	4º	1º	2º	
	* A "utilização" é representada em prioridade de escolha (1º, 2º, 3º ...), sendo "n" não recomendado									

MATERIAIS E METODOS

Apresentação da região do estudo de caso

O estudo de caso considerou a região do projeto de ampliação ferroviária próximo a Rondonópolis/MT. O tipo climático predominante na região, apresenta-se como Tropical de Savana - Aw, caracterizado por estação chuvosa no verão e estação seca no inverno, com temperatura média do mês mais frio superior a 18 °C e precipitação do mês mais seco menor que 60 mm. As precipitações anuais são superiores a 750 mm, atingindo até 1.800 mm (EMBRAPA, 2020).

Foram realizadas 9 coletas de amostras em que foram identificados materiais de granulometria incompatível com os sistemas de classificação tradicionais e com a metodologia MCT. Sua localização está apresentada na Figura 1. Destaca-se a profundidade das coletas realizadas, que variam de 0,74 m a 3,5 m, o que corresponde às espessuras de solos mais superficiais.



DOI: 10.29327/1430212.49-46

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO ESPERADO
DE SOLOS TROPICAIS DE GRANULOMETRIA TRANSICIONAL

AMOSTRA	Prof.	
	Início	Fim
ST-0816	0	1,5
ST-1A06	0	0,74
ST-0139	0	2
ST-0001	0	3,5
ST-1807	0	1,5
ST-1A05	0,15	1,5
ST-1A03	0	1,5
ST-0003	0	1,5
ST-0005	0	3,5

Figura 1. Mapa de localização das coletas de amostra

Ensaio geotécnicos realizados

Para obtenção dos parâmetros de classificação dos solos pelas metodologias utilizados no presente trabalho, foram realizados os ensaios de caracterização cujas normas de referência estão apresentadas na Tabela 3.

Em relação ao sequenciamento dos ensaios, primeiramente foi realizada a preparação das amostras para os ensaios de caracterização. Na sequência, foram realizados os ensaios de granulometria, limites, índice de suporte Califórnia (ISC), densidade real e MCT. A partir dos resultados destes ensaios, foi selecionado uma amostra representativa para realização dos ensaios triaxiais de carga repetida para determinação do módulo de resiliência e deformação permanente.

Tabela 3. Normativa dos procedimentos e ensaios realizados

Nº	Ensaio	Norma
01	Ensaio de granulometria	NBR 7181 (ABNT, 2016)
02	Ensaio de determinação do limite de liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016)
03	Ensaio de determinação do limite de plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016)
04	Ensaio de compactação	NBR 7182 (ABNT, 2016)
05	Ensaio de índice de suporte Califórnia	NBR 9895 (ABNT, 2016)
06	Ensaio de densidade real	NBR 6458 (ABNT, 2017)
07	Solos e agregados miúdos – determinação da umidade com emprego do “Speedy”.	DNER-ME 052/94 (DNIT, 1994a)
08	Ensaio triaxial de carga repetida – Módulo de Resiliência	ME 134/2018 (DNIT, 2018)
09	Ensaio triaxial de carga repetida – Deformação permanente	ME 179/2018 (DNIT, 2018)
10	Ensaio de compactação mini-MCV	DNIT 254/2023-ME, DNIT 228/2023-ME,
11	Ensaio de perda por imersão	DNIT 258/2023-ME
12	Classificação MCT	DNIT 259/2023-CLA,
13	Classificação G-MCT	Adaptado de Villibor e Alves (2017)
14	Preparação de amostras para ensaios de caracterização	ABNT 6457/2016
15	Rochas e solos - terminologia	NBR 6502 (ABNT, 1995)

Para viabilizar a análise do comportamento do solo em termos de deformação permanente foi realizado o ensaio triaxial com frequência de 5 Hz e 150.000 aplicações de carga para determinação



da deformação permanente a partir de 6 corpos de prova ensaiados nos pares de tensões confinante e desvio de 20 kPa/40 kPa, 20 kPa/60 kPa, 40 kPa/80 kPa, 40 kPa/120 kPa, 80 kPa/160 kPa e 80 kPa/240 kPa, respectivamente.

Por fim, foi aplicado o modelo de Guimarães (2009) conforme preconiza a norma ME 179 do DNIT (2018) para enquadramento do comportamento do material em termos de deformações plásticas, afim de determinar se ocorre o acomodamento das deformações ao longo dos ciclos de aplicação de cargas, conhecido como *Shakedown*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A descrição tátil-visual dos materiais ensaiados é apresentada na Tabela 4, em que pode-se observar a predominância de materiais arenosos com presença de pedregulhos ou não, de coloração avermelhada, amarelada e marrom.

Tabela 4. Descrição tátil-visual das amostras estudadas

AMOSTRA	Descrição Tátil-Visual
ST-0816	Areia (fina) argilosa, amarela
ST-1A06	Areia (fina), argilosa, marrom amarelada clara, com presença de lateritas
ST-0139	Argila arenosa, vermelha escura, com pedregulhos
ST-0001	Areia fina com pedregulho argiloso, vermelho
ST-1807	Areia (fina a média), pouco argilosa, marrom, com pedregulhos (finos a médios)
ST-1A05	Areia (fina) argilosa, marrom avermelhada clara, com presença de lateritas
ST-1A03	Pedregulho areno argiloso, marrom amarelada escura
ST-0003	Pedregulho areno argiloso, vermelho
ST-0005	Areia fina argilosa com pedregulho, vermelho

Os resultados obtidos para os ensaios de granulometria estão apresentados na Tabela 5 e pode-se observar que todas as amostras apresentam menos de 90% de passantes na peneira nº10, o que inviabiliza sua classificação pela sistemática MCT.

Tabela 5. Distribuição granulométrica das amostras analisadas.

AMOSTRA	PENEIRAS/ % PASSANTES										
	1"	3/4"	3/8"	nº4	nº10	nº16	nº30	nº40	nº60	nº100	nº200
ST-0816	97,6	95,0	87,0	64,9	44,4	38,9	32,0	26,2	19,3	15,8	12,5
ST-1A06	97,8	97,6	88,3	71,8	58,7	50,9	42,3	39,6	36,5	35,4	33,3
ST-0139	100,0	100,0	98,8	59,3	47,2	42,5	39,9	39,0	37,6	31,0	21,8
ST-1807	95,2	94,2	86,8	63,0	48,8	42,9	38,2	36,8	35,1	34,0	30,3
ST-1A05	100,0	100,0	95,4	73,2	44,2	38,0	32,9	31,5	30,1	29,7	28,6
ST-1A03	97,3	95,7	89,6	63,3	37,4	29,5	25,7	24,8	23,8	23,4	22,7
ST-0003	100,0	98,2	83,4	72,0	65,1	64,6	63,1	60,9	53,3	40,8	33,0
ST-0005	100,0	99,4	97,6	90,0	82,8	81,8	79,3	76,2	66,3	53,7	41,0

Os ensaios de limites e a classificação TRB e SUCS estão apresentados na Tabela 6 e evidenciam a ocorrência de índices de plasticidade que variam de 9% a 14% e classificação predominante destes solos como sendo A-2-4.



DOI: 10.29327/1430212.49-46

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO ESPERADO
DE SOLOS TROPICAIS DE GRANULOMETRIA TRANSICIONAL

Tabela 6. Limites físicos e classificação TRB e SUCS das amostras analisadas.

AMOSTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IG	TRB	SUCS
ST-0816	26,0	17,0	9,0	0	A-2-4	SC
ST-1A06	30,0	23,0	7,0	0	A-2-4	SM
ST-0139	33	24	9,0	0	A-2-4	SC
ST-1807	29,0	21,0	8,0	0	A-2-4	SC
ST-1A05	30,0	22,0	8,0	0	A-2-4	SC
ST-1A03	42,0	33,0	9,0	0	A-2-5	SC
ST-0003	31,8	17,5	14,3	1	A-2-6	SC
ST-0005	30,8	18,6	12,2	2	A-6	SC

Os ensaios mecânicos de compactação e índice de suporte Califórnia apresentaram os resultados evidenciados na Tabela 7, em que pode-se observar que as amostras ST-0816, ST-1A06 e ST-0139, possuem ISC superior a 20%. O critério de expansão é atendido em todas as amostras tendo em vista que nenhum apresenta mais de 1% de expansão.

Tabela 7. Índice de suporte Califórnia, compactação e massa específica das amostras.

AMOSTRA	Energia de Compactação	Peso específico seco máximo (g/cm ³)	Umidade Ótima (%)	CBR (%)	Expansão (%)	Massa específica Real (g/cm ³)
ST-0816	PN	2,03	9,71	37,30	0,05	2,58
ST-1A06	PN	1,88	15,70	26,29	0,13	2,55
ST-0139	PN	1,83	14,50	23,40	0,10	2,76
ST-1807	PN	1,91	13,66	15,71	0,10	2,56
ST-1A05	PN	1,90	12,60	14,70	0,14	2,52
ST-1A03	PN	1,83	16,40	12,97	0,13	2,59
ST-0003	PN	1,71	14,80	12,00	0,10	2,83
ST-0005	PN	1,68	17,40	9,90	0,10	2,84

Por fim, a Tabela 8 e a Figura 4 contêm os resultados dos parâmetros do método MCT, como a perda por imersão (Pi) e os coeficientes d' e c' oriundos da compactação mini-CBR, bem como a classificação MCT e G-MCT resultante. Observa-se que todos os materiais analisados apresentam comportamento laterítico e que não ocorreram solos classificados como solo com pedregulho (Sp).

Tabela 8. Coeficientes e classificação MCT das amostras estudadas.

AMOSTRA	d''	c'	Pi'	e'	MCT	Pen. nº 10	Pen. nº 200	G-MCT
ST-0816	44,1	1,24	45	0,97	LA'	44,4	12,5	Ps-LA'
ST-1A06	34,1	1,34	82	1,12	LA'	58,66	33,3	Gf-LA'
ST-0139	26,3	0,38	142	1,3	LA	47,2	21,8	Ps-LA
ST-1807	33,3	1,15	82	1,12	LA'	48,82	30,35	Gf-LA'
ST-1A05	37,5	1,53	112	1,18	NA'	44,23	28,63	Ps-LG'
ST-1A03	37,5	1,91	85	1,11	LG'	37,43	22,74	Ps-LG'
ST-0003	50	0,39	102	1,12	LA	65,09	32,98	Gf-LA
ST-0005	41,7	0,5	95	1,13	LA	82,75	40,97	Gf-LA



Rafael Lopes Witiuk,
 Maria Esther Soares Marques,
 Antonio Carlos Rodrigues Guimarães

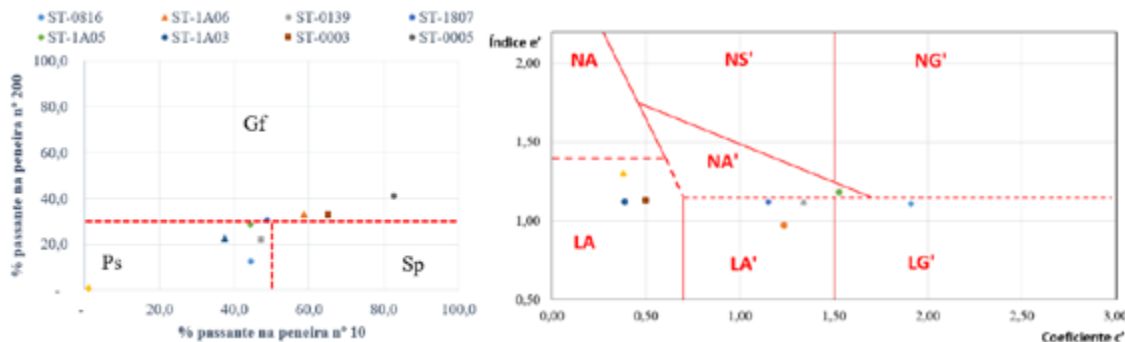


Figura 2. Classificação dos solos estudados pelo G-MCT (esq.) e MCT (dir).

A partir dos resultados de classificação apresentados acima e das propriedades físicas dos materiais estudados foi selecionada a amostra ST-1A03 para realização dos ensaios mecânicos triaxiais de cargas repetidas, tendo em vista que esta amostra apresentou a menor proporção de passantes na peneira nº10 e atendeu ao menor número de critérios de granulometria para aceitação em sublastro. Os resultados consolidados do ensaio de módulo de resiliência e de deformação permanente do material são apresentados na Figura 5. Para o estado de tensões do sublastro, em que se tem tensões confinantes de 40 kPa e tensões desvio de 140 kPa, o módulo de resiliência estimado a partir da regressão pelo modelo composto deste solo, apresentado na Equação 2, é da ordem de 146 MPa.

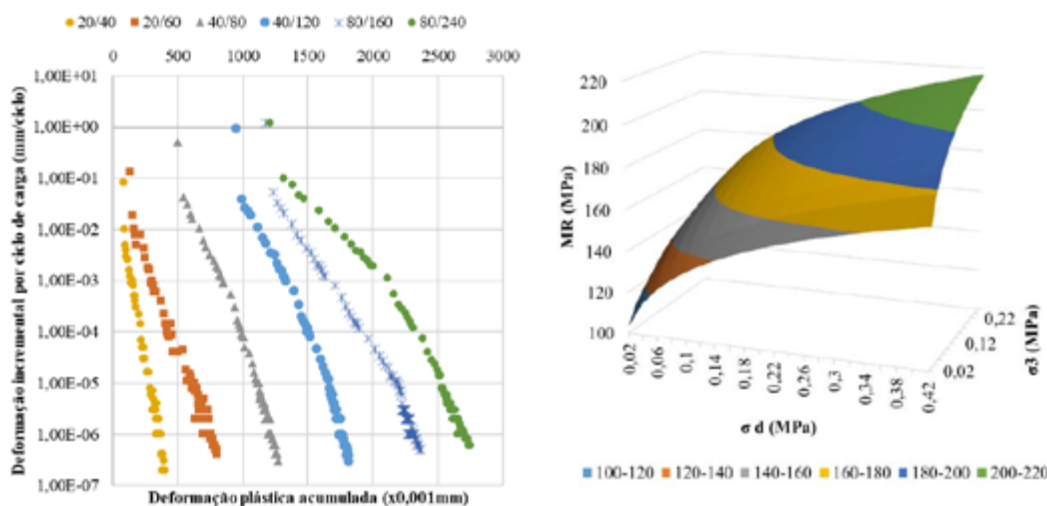


Figura 3. Curvas de deformação da amostra ST-1A03 para verificação da ocorrência do *shakedown* (a esq.) e resultado gráfico do modelo composto para estimativa do módulo de resiliência (à dir).

$$MR = 286,485 * \sigma_3^{0,105} * \sigma_d^{0,156} \tag{2}$$

Considerando a expectativa de número de eixos padrão de $2,2 \times 10^6$, obtém-se pela Equação 1, uma tensão admissível no sublastro da ordem de 161 kPa. O resultado da tensão admissível para o sublastro está próxima do limite de tensão para o qual a referida camada é sujeita na passagem das composições ferroviárias, que vai até 150 kPa segundo Lopes (2017), para uma carga por eixo de 40



DOI: [10.29327/1430212.49-46](https://doi.org/10.29327/1430212.49-46)

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO ESPERADO DE SOLOS TROPICAIS DE GRANULOMETRIA TRANSICIONAL

t. Em relação a deformação permanente, tem-se que o material em questão apresenta deformação máxima acumulada de 2,89 mm após a passagem 150.000 eixos.

Ademais, na Figura 3 são apresentadas as curvas de taxa de acréscimo da deformação para cada ciclo de carga e a deformação permanente total acumulada dos ensaios para pesquisa da ocorrência *do Shakedown*. Observa-se a formação de um ângulo relativamente fechado entre a curva e o eixo vertical, bem como uma linearidade das curvas, o que expressa um comportamento de acomodação das deformações plásticas. Pode-se verificar ainda que as taxas de deformação permanente de todos os pares de tensões apresentaram taxas de acréscimo de deformação da ordem de 10^{-7} , exceto para os ensaios em que foram utilizadas tensões desvio de 240 kPa e 160 kPa com tensão confinante de 80k Pa.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pode-se identificar que o solo de granulometria transicional estudado apresenta comportamento mecânico satisfatório para ser empregado enquanto camada de sublastro, uma vez que níveis de deformação permanente do material, além de baixos por se limitarem a 2,89 mm, também apresenta acomodação das deformações ao longo dos ciclos de aplicação de carga. Quanto ao comportamento elástico do material, pode-se afirmar que seu módulo de resiliência se encontra dentro dos limites aceitáveis para sua utilização no sublastro, podendo admitir tensões verticais totais de até 161 kPa. Desse modo, pode-se concluir que o solo pode ser empregado em pavimentação mesmo que não atenda aos critérios classificatórios tradicionais e tampouco possa ser classificado pela metodologia MCT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cavalcante, A. C.; Ribeiro, M. R. B. M.; Nunes, C.Y.; Sousa, J. G. M; Delgado, B.G. (2016). Análise Mecânica da Aplicabilidade de Solos Constituintes de Sublastro em Pavimentos Ferroviários, por meio de Parâmetros obtidos por Correlações com a Classificação MCT para Solos da Região Norte do Brasil - In: XVIII, CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Belo Horizonte. DOI:10.20906/CPS/GJ-08-0013.
- DNIT (2015). Departamento nacional de infraestrutura e transporte. ISF – 212: Projeto de superestrutura da via permanente – lastro e sublastro. 2015.
- Embrapa. (2020). Clima. Disponível: <https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>. Acesso 20 de abril de 2023.
- Indraratna, B., Salim, W., Rujikiatkamjorn, C. In: Advanced rail geotechnology Ballasted Track, Taylor & Francis Group, London, UK, 2011.
- Lopes, L. S. (2017). Análise experimental do comportamento hidráulico e mecânico de um pavimento ferroviário.
- Guimarães, A. C. R. (2009). Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 367.
- Rosa, A. C., de Oliveira Teixeira, M. A., Guimarães, A. C. R., de Oliveira, L., da Cruz, S. R., Pires, D. C. D. A. F., & de Freitas, R. G. (2019). Avaliação estrutural de pavimentos ferroviários do corredor centro sudeste paulista utilizando o software SysTrain. In 33 Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET.
- Vilarinho, M. K. C., Koetz, M., Schlichting, A. F., de Carvalho Silva, M., & Bonfim-Silva, E. M. (2013). Determinação da taxa de infiltração estável de água em solo de cerrado nativo. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI, 7(1).
- Villibor, D. F. (1974). Utilização de solos arenosos finos na execução de bases para pavimentos de baixo custo. São Carlos - Dissertação de Mestrado em Transportes-Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP).



Rafael Lopes Witiuk,
Maria Esther Soares Marques,
Antonio Carlos Rodrigues Guimarães

Villibor, D. F. e Alves, D. M. L. (2017). Classificação de Solos Tropicais de Granulação Fina e Grossa. Revista Pavimentação, Ano XII, nº 43, p. 17 a 37. Ed: ABPv. Rio de Janeiro,RJ, BRASIL

Villibor, D. F., & Nogami, J. S. (2009). Pavimentos Econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. Editora Arte & Ciência.



TRINCAS NA SUB-BASE EM UM SOLO DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO – ESTUDO DE CASO

Caio Vinicius Lemos Melo dos Santos¹; Guilherme Bravo de Oliveira Almeida²; & Joelson Hora Costa³

RESUMO

Este trabalho avalia o comportamento laterítico de um solo empregado na sub-base do pavimento de uma rodovia. Os ensaios tradicionais - análise granulométrica, limites de liquidez, limites de plasticidade, compactação e índice de suporte Califórnia - do projeto de pavimentação, atestaram a utilização desse solo como sub-base do pavimento. Ocorre que, em campo, trincas de variadas formas - em blocos, longitudinais e transversais - e de variados calibres - de poucos milímetros a mais de 1,0 cm - foram notadas após poucas horas da compactação da camada, o que surpreendeu a equipe responsável pela obra, que deu início a uma investigação de suas possíveis causas. O fato é que o projeto não fez qualquer registro acerca de eventuais características lateríticas do solo da jazida Jabotiana. Ainda assim, ensaios foram realizados para a classificação do solo, segundo a metodologia MCT: compactação; perda de massa por imersão e mini-MCV, cujos parâmetros obtidos indicaram solo de comportamento laterítico, argiloso, classificado como LG'. Previa-se a utilização desse solo em duas subcamadas de sub-base, cada uma delas compactadas com espessura de 18 cm, totalizando 36 cm. Todavia seu comportamento inesperado, tendo em vista as características das trincas, levou os responsáveis pela obra a buscarem solo de outra procedência para a segunda parte da sub-base, com receio, sobretudo, de eventual reflexão dessas trincas para as camadas superiores (base e revestimento). O surgimento de trincas finas (de até 2,0 mm), por contração, em solos argilosos de comportamento laterítico tem registro em vários estudos e são observadas na prática. Um estudo referencial mostra a presença desse tipo de solo na região da área de estudo. Na execução em campo, as trincas foram tratadas como recomendado na bibliografia.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Tropical; MCT; Obra Rodoviária.

ABSTRACT

This research evaluates the lateritic behavior of a soil used as a sub-base for the highway. The traditional tests - granulometric analysis, liquidity limits, plasticity limits, compaction and California support index - of the paving project attested to the use of this soil as the pavement sub-base. However, in the field, cracks of various shapes - in blocks, longitudinal and transverse - and of various sizes - from a few millimeters to more than 1.0 cm - were noticed a few hours after the layer had been compacted, which surprised the team responsible for the work, who began to investigate the possible causes. The fact is that the project made no record of any lateritic characteristics of the soil from the Jabotiana deposit. Even so, tests were carried out to classify the soil according to the MCT methodology: compaction, loss of mass by immersion and mini-MCV, the parameters of which indicated a lateritic, clayey soil, classified as LG'. This soil was to be used in two sub-base layers, each compacted to a thickness of 18 cm, for a total of 36 cm. However, its unexpected behavior, due to the characteristics of the cracks, led those responsible for the work to look for soil from another source for the second part of the sub-base, fearing, above all, that the cracks might be reflected in the upper layers (base and coating). The appearance of fine cracks (up to 2.0 mm), due to contraction, in clayey soils with lateritic behavior has been recorded in several studies and are observed in practice. A reference study shows the presence of this type of soil in the region of the study area. In the field, the cracks were treated as recommended in the literature.

KEY WORDS: Tropical Soil; MCT; Roadwork.

¹ Graduando, Universidade Federal de Sergipe, caiolemosmelo@gmail.com

² Professor Adjunto, Universidade Federal de Sergipe, gboa@academico.ufs.br

³ Professor Adjunto da Universidade Federal de Sergipe e da Faculdade Pio Décimo, joelsonhcosta@gmail.com



INTRODUÇÃO

No Brasil, os projetos de pavimentação rodoviária vêm, por décadas, empregando o CBR (Califórnia Bearing Ratio) ou ISC (Índice de Suporte Califórnia) no dimensionamento de pavimentos flexíveis. É entendimento já pacificado que esse método de dimensionamento, desenvolvido por O. J. Porter, engenheiro do departamento de estradas da Califórnia, arrima-se no critério de resistência ao cisalhamento do subleito obtida pelo ensaio do CBR e, portanto, pode não ser metodologia adequada aos solos brasileiros, de ambiente de clima tropical úmido, que apresentam formação diferente daqueles de clima temperado.

Diante das dificuldades e deficiências no uso das classificações tradicionais, Nogami e Villibor desenvolveram uma metodologia designada MCT (Miniatura Compactado Tropical), específica para solos tropicais (VILLIBOR; NOGAMI, 2009).

De acordo com Villibor *et al.* (p. 20, 2009) existem duas grandes classes de solos em regiões tropicais úmidas, solos lateríticos e solos saprolíticos: solos lateríticos são solos superficiais, típicos das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas, resultantes de uma transformação da parte superior do subsolo pela atuação do intemperismo, por processo denominado laterização. Afirmam os autores, que esses solos apresentam propriedades peculiares e de comportamento. Já os solos saprolíticos são aqueles que resultam da decomposição e ou desagregação *in situ* da rocha matriz pela ação das intempéries (chuva, insolação, geadas) e mantêm, de maneira nítida, a estrutura da rocha que lhe deu origem.

O método tradicional para seleção de um solo a ser utilizado na estrutura do pavimento apresenta limitações e deficiências, sobretudo para solos lateríticos, desde a classificação até os critérios de dosagem. Villibor e Nogami (2009) exemplificam casos de solos lateríticos e saprolíticos, classificados pelos métodos tradicionais da HRB-AASHTO, que se mostram adequados ao uso nas camadas do pavimento.

Quando se utiliza materiais de comportamento laterítico, a norma define valores mais amplos para o limite de liquidez (LL inferior ou igual a 40%) e índice de plasticidade (IP inferior ou igual a 15%). Ainda são resguardadas outras condicionantes para os solos lateríticos, destacando a não presença de argilominerais expansivos (DNIT-ES 098).

Este trabalho apresenta um estudo de caso em que avalia o comportamento de um solo identificado como laterítico, em uma obra rodoviária, tendo em vista a ocorrência de trincas severas, logo após a compactação da camada de sub-base. É fato comum a ocorrência de trincas finas em camadas compactadas com solos argilosos finos lateríticos, todavia a elevada intensidade e calibre das trincas observadas, no presente estudo, sobressaltaram os responsáveis pela obra.

Breve Abordagem da Classificação MCT

A metodologia MCT divide os solos em laterítico e saprolítico. De acordo com a norma DNIT-CLA 259 (adaptado de Villibor e Alves (2019)), os solos finos de comportamento laterítico, são designados pela letra L e podem ser areias com poucos finos (LA); areias argilosas e finos lateríticos (LA'); e argilas, argilas siltosas, argilas arenosas e siltes argilosos (LG'). Os solos saprolíticos, isto é, os de comportamento não lateríticos são designados pela letra N e podem ser areias e/ou siltes compostos por quartzo e/ou mica (NA); areias quartzosas com finos e mica na fração areia (NA'); siltes e siltes



DOI: 10.29327/1430212.49-35

TRINCAS NA SUB-BASE EM UM SOLO DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO – ESTUDO DE CASO

arenosos (NS'); e argilas, argilas siltosas, argilas arenosas e siltes argilosos (NG'). A Figura 1 mostra graficamente a distribuição desses grupos de solo tendo por base os valores do coeficiente c' e o índice e' para a classificação MCT.

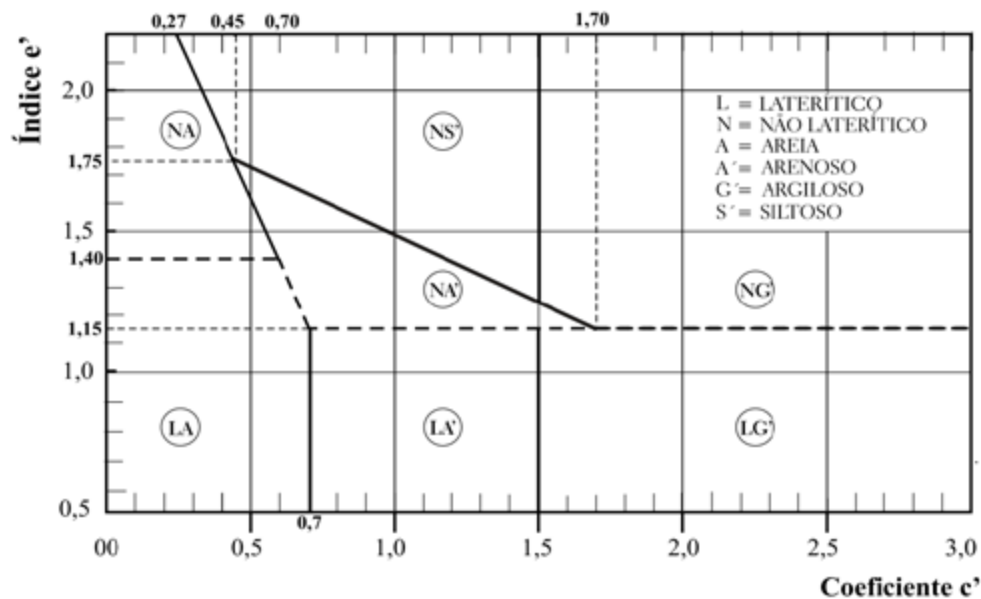


Figura 1. Gráfico da classificação de solos MCT. (VILLIBOR; NOGAMI, 2009).

O coeficiente de argilosidade (c') é o coeficiente angular da parte retilínea e mais inclinada da curva de deformabilidade com Mini-MCV 10. Correlaciona-se com a granulometria. Da Figura 1, observa-se que o coeficiente c' sendo maior que 1,5 indica um solo com características argilosas. Abaixo desse valor, caracteriza as areias e siltes.

Já o índice e' é calculado pela Equação 1. Esse índice indica o comportamento laterítico ou não laterítico, conforme seja menor ou maior que 1,15 respectivamente, como se observa da Figura 1 (quando $e = 1,40$, indica solos pobres em finos).

$$e' = [(Pi/100) + (20/d')]^{1/3} \quad (\text{Equação 1})$$

O Pi da Equação 1 indica a perda de massa por imersão que é representada por uma porcentagem de massa seca despreendida do corpo de prova imerso em água em relação à massa seca da amostra compactada. De acordo com Nogami e Villibor (1995), em solos saprolíticos, geralmente, os valores de Pi são superiores aos dos solos lateríticos. O coeficiente d' representa a inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes no ensaio Mini-MCV. Segundo Nogami e Villibor (1995), d' acima de 20 indica as argilas lateríticas, apresentando menores valores para as não lateríticas e areias puras. Nas areias finas argilosas o d' é muito elevado. Em geral os solos saprolíticos apresentam d' muito pequeno.



Caracterização do Estudo de Caso

A área do estudo compreende uma obra rodoviária, em execução, no município de São Cristóvão/Sergipe, que interligará a Rodovia SE-065, também conhecida como Rodovia João Bebe Água, à Rodovia BR-101. A implementação desta nova rodovia tem como objetivo principal facilitar o acesso da região conhecida como “Grande Rosa Elze”, em São Cristóvão ao Distrito Industrial do Município, localizado às margens da Rodovia BR-101. O Estudo foi realizado com o objetivo de diagnosticar o comportamento de um solo utilizado como sub-base do pavimento, tendo em vista o surgimento de trincas intensas e de variados tipos, em curto período após ser compactado, embora tenha o solo, apresentado características adequadas para o referido uso, atendendo aos parâmetros exigidos nos ensaios tradicionais.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

O solo da jazida Jabotiana, localizada no Município de São Cristóvão, foi o material definido, em projeto, para utilização como camada de sub-base do pavimento da rodovia, na espessura de 36 cm, a ser executada em duas “subcamadas” de 18 cm cada.

A Figura 2 mostra uma vista parcial da jazida, onde ocorreu a extração do solo, e uma imagem aérea (Google Maps) onde está localizada a jazida (ponto vermelho na Figura).

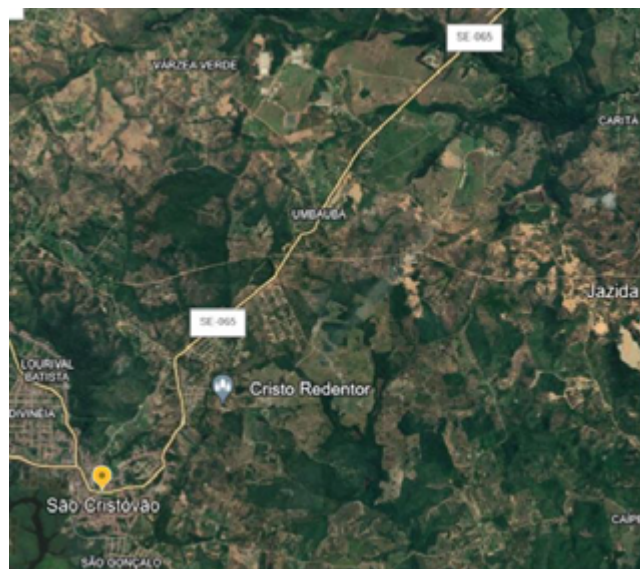


Figura 2. Vista parcial e localização da jazida (AUTOR, 2024).

Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica, seguindo-se os procedimentos tradicionais, em 02 (dois) laboratórios distintos. Nas preparações das amostras foi observada a norma DNER-ME 041. Para os ensaios de análises granulométricas seguiu-se a norma DNER-ME 080. Já para os limites de consistência foram observadas as normas DNER-ME 082, para os limites de plasticidade (LP), e a norma DNER-ME 122, para os limites de liquidez (LL). Para os ensaios de



DOI: [10.29327/1430212.49-35](https://doi.org/10.29327/1430212.49-35)

TRINCAS NA SUB-BASE EM UM SOLO DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO – ESTUDO DE CASO

compactação seguiu-se a norma DNER-ME 162 com energia intermediária e a norma DNER-ME 172 para definição do ISC. Vale registrar que todos esses ensaios foram repetidos por laboratoristas e equipamentos distintos.

Para a classificação do solo, segundo a metodologia MCT, as normas seguidas foram DNIT 258/2023 e DNIT 259/2023,

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em uma avaliação tátil-visual, o solo se apresenta como uma mistura de areia em uma fração menor de silte e/ou argila, e pedregulho. Porém, este último com participação muito pequena. Os resultados de ensaios realizados em ambos os laboratórios são muito similares de forma que são apresentados os resultados de um deles.

A Figura 3 mostra uma das curvas granulométricas obtida. Segundo a escala granulométrica da AASHTO o solo em análise possui 2,14% de pedregulho, 78,71% de areia e 19,15% de silte e argila. Os limites de Atterberg indicaram LL de 23% e LP de 19%, com índice de plasticidade (IP) de 4%. De acordo com o método de classificação tradicional HRB-AASHTO, este solo pertence ao grupo A-2-4 (0), ou seja, é um solo que se apresenta como areia siltosa e qualidade geral como subleito de excelente a boa.

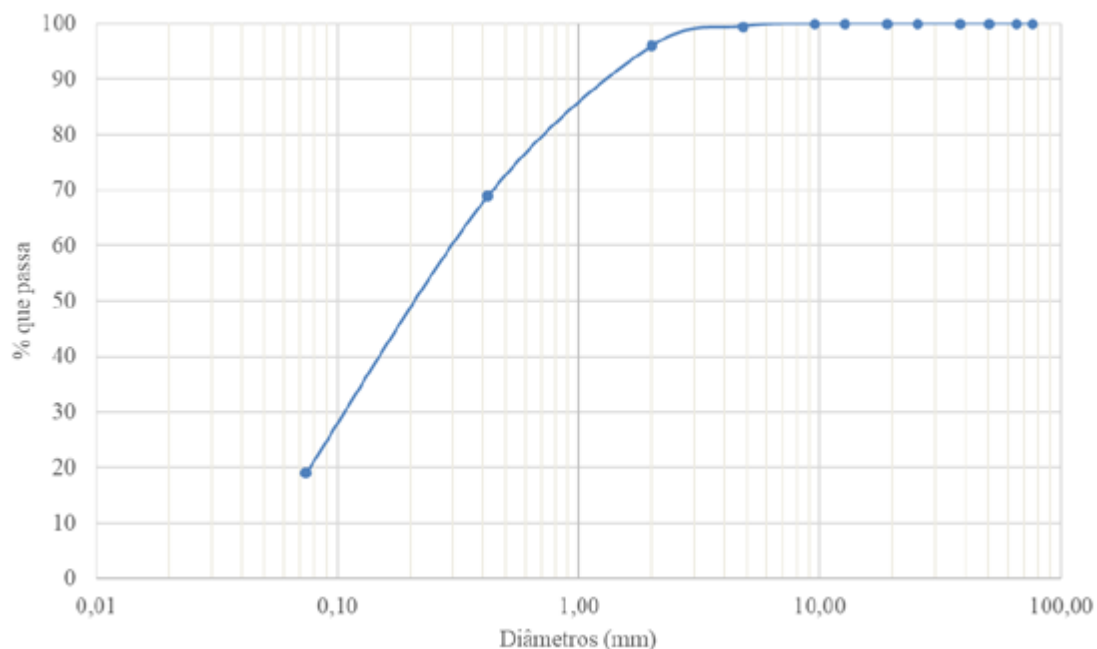


Figura 3. Curva granulométrica do solo (AUTOR, 2024).

A Figura 4 mostra a curva de compactação para a energia do Proctor intermediário. Os parâmetros obtidos foram $1,935 \text{ g/cm}^3$ para a massa específica aparente seca máxima e 9,3% para a umidade ótima. O ensaio de ISC resultou em 28% com 0,27% de expansão.

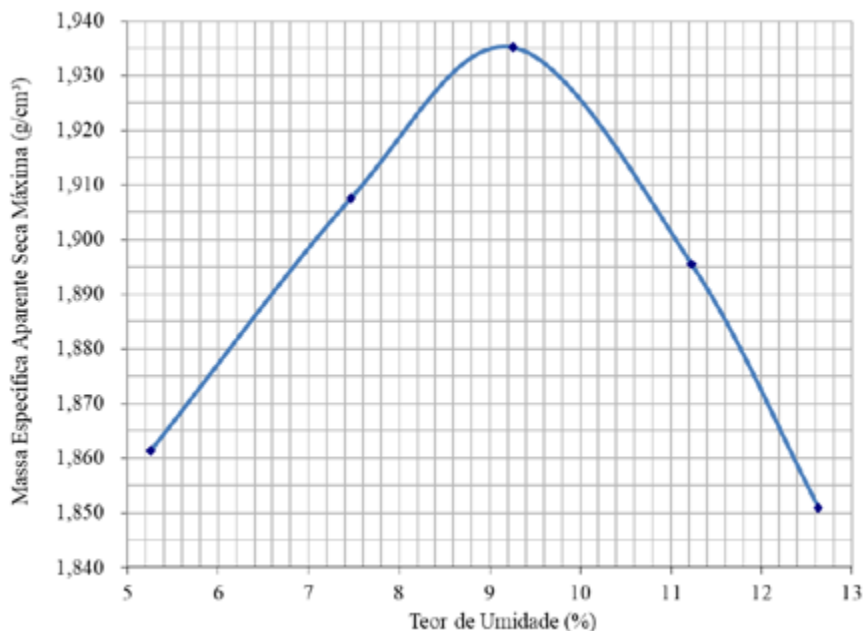


Figura 4. Curva de compactação do solo (AUTOR, 2024).

A seguir são apresentadas as curvas obtidas a partir dos ensaios da metodologia MCT para o solo em estudo. A Figura 5 mostra as curvas para determinação do coeficiente d' e a Figura 6 para o coeficiente c' .

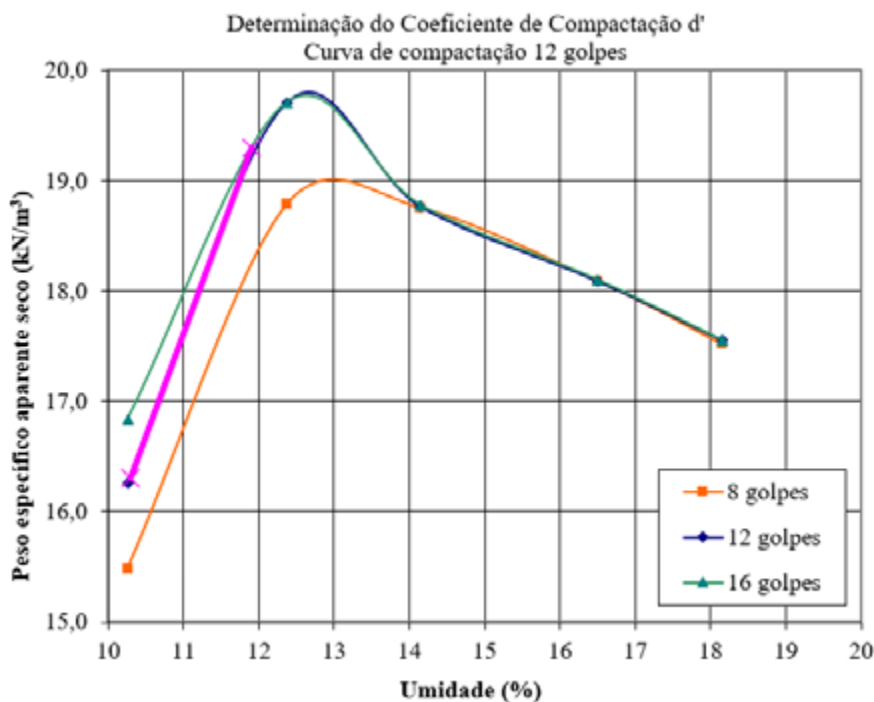
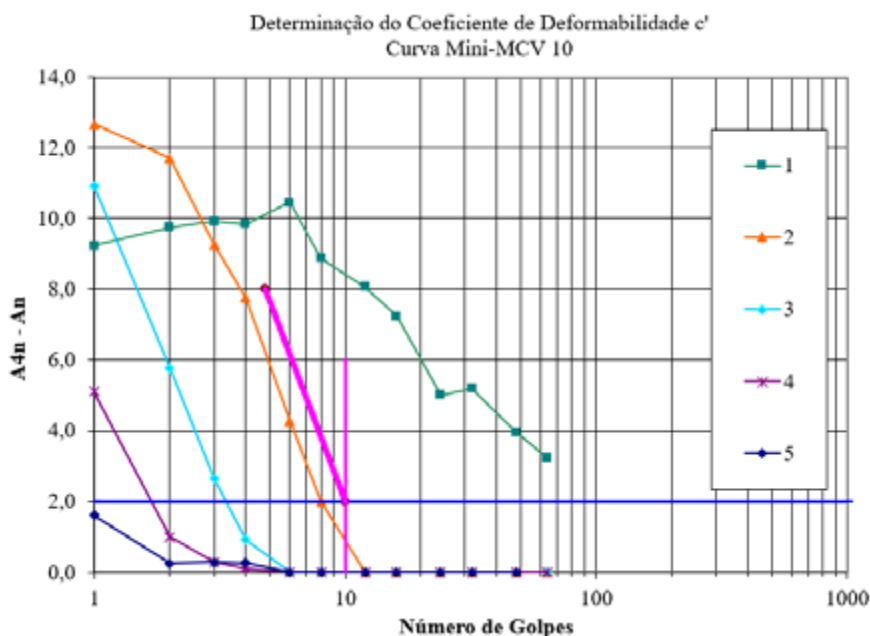


Figura 5. Determinação do coeficiente d' (AUTOR, 2024).



DOI: 10.29327/1430212.49-35

TRINCAS NA SUB-BASE EM UM SOLO DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO – ESTUDO DE CASO

Figura 6. Determinação do coeficiente de deformabilidade c' (AUTOR, 2024).

A Tabela 1 mostra os valores dos parâmetros da metodologia MCT. A partir dos resultados de P_i e d' , calcula-se pela Equação 1 o valor do índice e' .

Tabela 1. Resultados dos ensaios da metodologia MCT (Autor, 2024).

Parâmetro	valor
coeficiente c'	1,88
d'	187,5
P_i	81
e'	0,97

Assim, inserindo-se no gráfico de classificação da MCT o coeficiente c' e o índice e' denotam que o solo da jazida Jabotiana, considerando a amostra coletada, é um solo argiloso de comportamento laterítico LG'. A Figura 7 mostra o ponto em vermelho que indica tal classificação.

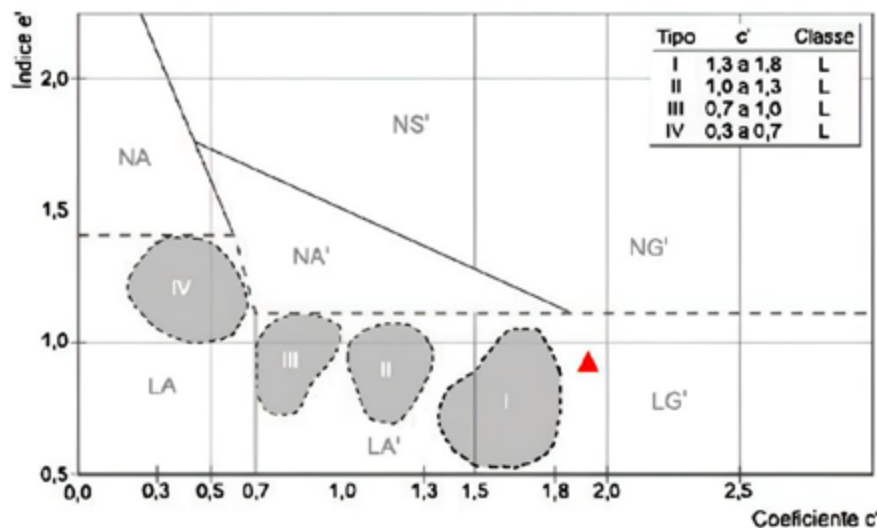


Figura 7. Gráfico de classificação do solo laterítico (Adaptado de VILLIBOR ET AL., 2009).

De acordo com Villibor e Alves (2019) incluem-se no grupo LG', as argilas, as argilas arenosas e/ou siltosas e os siltes argilosos. Ainda, Villibor et al. (2009) acrescentam que solos LG' são argilas e argilas arenosas de baixa expansão, plasticidade média a alta, dentre outras propriedades.

Tratando-se da granulometria, é possível observar, pela curva da Figura 3, uma elevada participação da fração areia com uma menor fração fina passante na peneira 200 (0,075 mm), o que indica um solo do tipo areia argilosa ou areia siltosa.

No ensaio de expansão, realizado junto ao ISC, o solo apresentou valor menor que 0,5% e para a plasticidade, o IP acusou um resultado de 4%, indicando baixa plasticidade, esses resultados ressaltam as características de baixa plasticidade do solo em contraponto ao que afirmam os autores citados que caracterizam os solos classificados como LG' como de média a alta plasticidade.

Reforça o resultado da classificação MCT, obtida neste estudo, o trabalho de Costa (2006). Nos estudos desse autor, abrangendo 12 amostras de solo laterítico e 4 amostras de solo não laterítico, todas coletadas na região costeira do estado de Sergipe, foi registrado ocorrência de solo de comportamento laterítico da jazida Jabotiana, que também foi classificada como LG'.

De acordo com a norma DNIT-ES 139, os materiais de sub-base devem apresentar ISC maior ou igual a 20%, expansão menor ou igual a 1%, além do Índice de Grupo zero (IG = 0). Registra, entretanto, a referida norma que, tratando-se de solos de comportamento laterítico, pode-se ter IG diferentes de zero, desde que a expansibilidade apresente um valor inferior a 10%. Portanto, de acordo com essas referências, o solo em estudo atende as condições específicas para utilização como material de sub-base.

Verificação das Operações em Campo

Afirmam Nogami e Villibor (1995) que a presença de óxidos garante uma tonalidade avermelhada, rósea, arroxeadada ou amarelada aos solos lateríticos. No caso da amostra da jazida Jabotiana, do presente estudo, a coloração amarelada se destaca o que pode ser indicativo da presença de óxido de alumínio.



DOI: [10.29327/1430212.49-35](https://doi.org/10.29327/1430212.49-35)

TRINCAS NA SUB-BASE EM UM SOLO DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO – ESTUDO DE CASO

Em campo, trincas de variadas formas - em blocos, longitudinais e transversais – e de variados calibres – de poucos milímetros a mais de 1,0 cm - foram notadas após poucas horas da conclusão da compactação, o que levou a equipe da supervisora da obra a iniciar investigação de suas possíveis causas.

O fato é que o projeto de pavimentação não fez qualquer registro acerca de possíveis características lateríticas do solo da jazida Jabotiana. Ainda assim, foram providenciados os ensaios para classificação MCT, que indicou solo de comportamento laterítico do grupo LG’.

A Figura 8 mostra a camada de sub-base compactada com o solo LG’ da jazida Jabotiana. É visível a presença de trincas variadas e de fino a grosso calibre



Figura 8. Formação de trincas em um solo LG’ (AUTOR, 2024).

A ocorrência de trincas em camadas de solo de comportamento laterítico já foi observada em Delgado; Silva e Guimarães (2016), que citam ainda que esse tipo de material possui baixa permeabilidade e alta resistência mecânica, e pode ser explicado por Nogami e Villibor (p.35, 2009) quando estes autores descrevem as deficiências na previsão de problemas construtivos, entre elas, “o trincamento excessivo da base, por contração provocada pela perda de umidade, refletindo, em alguns casos, na camada de revestimento, com conseqüente redução da vida útil do pavimento e da sua serventia”. Ainda segundo os autores, “o desenvolvimento de trincas em bases de solo arenoso fino laterítico é uma constante e ocorre desde a fase de construção” (NOGAMI; VILLIBOR, p.27, 2009). Vale aqui registrar a presença de quatro áreas destacadas (hachuradas) no gráfico utilizado para a classificação MCT (vide Figura 7) em que Villibor *et al.* (2009) detalham as técnicas construtivas de uma série de solos pertencentes a essas quatro áreas apresentadas. O solo em estudo posiciona-se nas proximidades da área I e, para os solos posicionados nessa área, o processo construtivo recomenda, entre outros, “deixar a base perder umidade, por secagem, num período de 48 a 60 horas ou até a ocorrência de trincas com largura de 2 mm” (VILLIBOR *et al.*, p.59, 2009). A contração nesse tipo de solo é de média a elevada, com formação de placas da ordem de 30 x 30 cm.



Esses autores citam casos de obras que apresentaram comportamento similar ao aqui exposto. Entre as técnicas para “tratamento” das trincas, procedeu-se o seu preenchimento com areia e argila. Outra forma é a mistura de solo argiloso e brita. Uma terceira opção, segundo ainda descrevem os autores, é a saturação superficial da camada de solo argiloso e cravamento de agregado britado (cuidados devem ser tomados com a secagem da superfície).

Importa destacar que, no caso presente, o avanço das trincas foi interrompido com a secagem do solo – “cimentação” - mantendo-se a partir daí em um mesmo patamar.

Quanto ao procedimento utilizado para tratamento das trincas, este se deu mediante o umedecimento da camada compactada e posterior raspagem com a lâmina da motoniveladora arrastando-se o solo superficialmente para fins de fechamento das trincas.

A Figura 9 mostra a camada com a presença de uma trinca longitudinal em destaque. É possível visualizar as marcas que as patas do rolo compactador pé de carneiro deixa na camada argilosa. Uma característica dos solos limitados pela área I, da Figura 7, é a excelente capacidade de ser compactado, alcançando elevados graus de compactação para a energia intermediária. Os graus de compactação obtidos em campo resultaram sempre em valores superiores a 100%.



Figura 9. Trincas apresentadas na camada de um solo LG' entre as estacas 78 e 108. (AUTOR, 2024).

Importa registrar que as ocorrências de solos aptos para utilização como sub-base de pavimentos asfálticos encontram-se, na região do projeto, praticamente esgotadas ou, de outro modo, as jazidas não apresentam licenciamento para exploração.

Dessa forma, na segunda subcamada da sub-base foram empregados solos remanescentes de outras jazidas - pedregulhos areno argilosos, não lateríticos;

Outra medida preventiva contra a reflexão das trincas se deu com a utilização de “brita corrida” para execução da camada de base do pavimento;

CONSIDERAÇÕES FINAIS



DOI: [10.29327/1430212.49-35](https://doi.org/10.29327/1430212.49-35)

TRINCAS NA SUB-BASE EM UM SOLO DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO – ESTUDO DE CASO

Arrimado nas recomendações da metodologia tradicional, tem-se que os resultados de ISC, IG e expansão recomendaram a utilização do solo da jazida Jabotiana, na sub-base do pavimento; Não obstante o projeto de pavimentação deixar de apresentar qualquer menção acerca de eventual comportamento laterítico desse solo, foi o surgimento de trincas logo após a compactação da camada, o que levou os responsáveis pela obra a utilizarem os ensaios da metodologia MCT com o fito de investigar essa propriedade, o que ficou confirmado com o enquadramento do solo no grupo das argilas lateríticas LG’.

Mesmo cientes de que a ocorrência de trincas por contração advém da natureza desses solos - como já registrado por vários pesquisadores – o material se mostrou muito reativo e foram, de fato, as elevadas, frequência e amplitude, das trincas que levou a supervisora das obras a suspender a execução da segunda subcamada de sub-base com o solo da jazida Jabotiana (seriam 36 cm de sub-base, executados em duas subcamadas de 18 cm cada), além de realizar o “tratamento” das trincas, como recomendado na bibliografia.

Outra medida preventiva contra a reflexão das trincas se deu com a utilização de “brita corrida” na execução da camada de base do pavimento.

Assim, os cuidados devidos, em campo, foram tomados e espera-se que as providências adicionais adotadas sejam suficientes para se evitar a reflexão das trincas para as camadas superiores (base e revestimento). Pretende-se prosseguir com as avaliações e inspeções de comportamento desse trecho da rodovia bem como na discussão acerca de experiências de utilização de solos de comportamento similar, em outras rodovias.

Agradecimento

Os autores deste trabalho agradecem à Intervia – Consultoria e Projetos Ltda e ao Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal de Sergipe.

REFERÊNCIAS

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial. Brasília: CNT, 2017.

COSTA, J. H. Caracterização geotécnica dos solos finos da faixa litorânea e tabuleiros costeiros do Estado de Sergipe, visando aplicação em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

DELGADO, B. G.; SILVA, J. C. F.; GUIMARÃES, A. C. R. Estudos geotécnicos para projeto de via férrea sobre subleito de solo laterítico na região norte do Brasil. 15º Congresso Nacional de Geotecnia, Porto, Portugal, 2016.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 041: solo: preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 080: solos: análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 082: solos: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 093: solos: determinação da densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1994.



DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 122: solos: determinação do limite de liquidez: método de referência e método expedito. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 162: solos: ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 258/2023 – ME: Solos – Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio. Brasília: DNIT, 2023.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 259/2023 – CLA: Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação. Brasília: DNIT, 2023.

GOOGLE. Imagem por satélite da Jazida Jabotiana no município de São Cristóvão, 2022. Disponível em: <https://earth.google.com/web/search/S%c3%a3o+Crist%c3%b3v%c3%a3o,+SE/@-11.01949071,-37.18815915,45.66934526a,8146.08065613d,35y,360h,0t,0r/data=CigiJgokCRIGSCd8ziXAETMFJw2KHybAGV5nhd uNfkLAIe7BOjxsp0LAOgMKATA>. Acesso em 02 de maio de 2024.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Vilibor, 1995. 240 p.

VILLIBOR, D. F.; ALVES, D. M. L. Pavimentação de baixo custo em regiões tropicais. Florianópolis: Tribo da Ilha, 2019. Disponível em: https://issuu.com/alancgermano/docs/ebook_pavimentacao_de_baixo_custo. Acesso em 29 abril de 2024.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

VILLIBOR, D. F. et al. Pavimentos de baixo custo para vias urbanas. 2. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.



UTILIZAÇÃO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA ANÁLISE DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS TROPICAIS E PREDIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO MCT

Whilison M. Mendonça¹; Felício G. Oliveira²; Geraldo L. O. Marques³; Diogo R. S. Baudson¹, Marco Antônio G. Antunes⁴ & Gustavo F. Teixeira¹

RESUMO

A avaliação dos materiais utilizados na pavimentação envolve a execução de ensaios geotécnicos que contemplam diversos parâmetros. A interpretação isolada de cada um dificulta a decisão de utilização ou exclusão do material. Além disso, ainda hoje, muitos laboratórios de geotecnia não possuem os equipamentos necessários ou o conhecimento técnico para realização dos ensaios da metodologia MCT (miniatura, compactado, tropical) e dessa forma, classificar os solos tropicais. Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivo principal utilizar técnicas estatísticas multivariadas a fim de analisar um conjunto de diferentes variáveis geotécnicas. De forma complementar, foi comparada a eficiência dos ensaios de equivalente de areia e adsorção do Azul de Metileno para avaliar a fração fina dos solos tropicais. Para tanto, foram consideradas 20 propriedades geotécnicas (variáveis numéricas) de 12 solos tropicais (medidas). Os resultados mostraram vantagem na utilização da adsorção do Azul de Metileno frente ao equivalente de areia para avaliação da fração fina. As análises estatísticas evidenciaram fortes correlações entre os parâmetros da metodologia MCT e outros de ensaios mais simples, como a análise granulométrica e os limites de consistência. Foram gerados dois modelos para prever os coeficientes c' e e' (MCT), a partir de outras variáveis numéricas, que apresentaram assertividade de 83% na previsão da classificação MCT para as doze amostras analisadas. Ressalta-se, que os modelos obtidos são estudos estatísticos iniciais que devem ser ampliados, principalmente em número de amostras, para que seja possível classificar os solos tropicais em casos que não há recursos para execução dos ensaios ou a nível de pré-projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Solo tropical; Classificação MCT; Estatística Multivariada; Regressão Linear Múltipla.

ABSTRACT

The evaluation of materials used in pavement construction involves conducting geotechnical tests that encompass various parameters. Interpreting each parameter in isolation complicates the decision to use or exclude a material. Moreover, many geotechnical laboratories still lack the necessary equipment or technical expertise to perform tests using the MCT (Miniature, Compacted, Tropical) methodology and thus classify tropical soils. In this context, the primary objective of this study is to employ multivariate statistical techniques to analyze a set of different geotechnical variables. Additionally, the efficiency of the Sand Equivalent and Methylene Blue Adsorption tests was compared to evaluate the fine fraction of tropical soils. The study considered 20 geotechnical properties (numerical variables) of 12 tropical soils (samples). The results demonstrated the superiority of Methylene Blue Adsorption over the Sand Equivalent test for evaluating the fine fraction. Statistical analyses revealed strong correlations between the parameters of the MCT methodology and simpler tests, such as particle size analysis and consistency limits. Two models were developed to predict the coefficients c' and e' (MCT) based on other variables. The models demonstrated an accuracy of 83% in predicting the MCT classification of the twelve samples. The presented models are preliminary statistical studies that need more soil samples to predict the MCT classification of tropical soils when testing is unavailable or for preliminary project stages.

KEY WORDS: Tropical soil; MCT classification; Multivariate statistic; Multiple linear regression.

¹ Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, whilison@ufop.edu.br; diogo.baudson@ufop.edu.br; gustavo.ft@aluno.ufop.edu.br

² Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, Superint. Reg. de MG, felicio.gerald@dnit.gov.br

³ Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Departamento de Transportes e Geotecnia, gerald.marques@ufjf.br

⁴ Ministério Público do Estado de Minas Gerais, marcoantonioantunes56@gmail.com



INTRODUÇÃO

O estudo e aplicação de solos tropicais lateríticos em estradas no Brasil teve início na década de 1950, quando uma base de rodovia foi construída com argila laterítica e permaneceu em boas condições por mais de 20 anos (NOGAMI; VILLIBOR, 1995). O avanço no conhecimento sobre o uso desses solos em pavimentação de baixo custo foi impulsionado, principalmente, pelo Prof. Job Shuji Nogami, ao longo da segunda metade do século XX. Atualmente, além das metodologias tradicionais e estrangeiras de classificação de materiais para pavimentação, a metodologia MCT é amplamente utilizada para entender as características e o comportamento dos solos em climas tropicais úmidos.

A importância de diferenciar solos tropicais lateríticos de saprolíticos reside no comportamento favorável dos primeiros para pavimentação, ao passo que os últimos frequentemente apresentam desempenho inferior (NOGAMI; VILLIBOR, 1995). Os ensaios utilizados internacionalmente para classificar os solos e pedregulhos quanto ao comportamento esperado na pavimentação não refletem com eficiência as características dos solos tropicais. A classificação HRB-AASHTO classifica os materiais em sete grupos, considerando sua granulometria, limite de liquidez (LL), índice de plasticidade (IP) e Índice de Grupo (IG). Os solos tropicais lateríticos geralmente são classificados no grupo 6 ou 7, sendo considerados de qualidade regular a pobre para pavimentação. Contudo, a prática no Brasil confirmou que essa classificação leva à subutilização de muitos solos tropicais com excelentes propriedades (BALBO, 2007).

A metodologia MCT consiste em grupos de ensaios realizados em corpos de prova compactados em miniatura, dos quais são obtidos os coeficientes de argilosidade (c') e laterização (e'), possibilitando classificar o solo em um dos 7 grupos (quatro não lateríticos e três lateríticos) do ábaco. Apesar da consolidação dessa metodologia no Brasil, alguns critérios normativos ainda citam exigências de outros parâmetros que os solos não conseguem atingir, como, por exemplo, o equivalente de areia.

A norma DNIT 098/2007 trata da execução de base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico. Segundo os critérios normativos, os solos lateríticos de granulação fina devem possuir equivalente de areia (EQA) mínimo de 30% (DNIT, 2007). Tal valor dificilmente é alcançado pelos solos lateríticos argilosos, embora apresentem boas características para aplicação em pavimentos. Conforme relatado por Oliveira *et al.* (2023), o EQA não é eficiente para avaliar a nocividade dos solos tropicais para as estruturas dos pavimentos. Os autores sugerem que a classificação MCT deve ser tomada como referência e recomendam a utilização do ensaio de adsorção de Azul de Metileno para verificar a atividade da fração argila.

Os resultados obtidos a partir dos inúmeros ensaios geotécnicos de laboratório existentes precisam ser avaliados e interpretados para uma escolha adequada do material que irá compor as camadas de uma rodovia. A decisão deve ser baseada na avaliação do conjunto de resultados das variáveis independentes que representam o comportamento do material. As técnicas de estatística multivariada permitem organizar os dados de forma a criar conhecimento e melhorar a tomada de decisões, permitindo analisar as múltiplas características do material sob investigação. Dessa forma, o objetivo da análise multivariada é medir, explicar e prever o grau de relação entre as variáveis estatísticas e combinações ponderadas das variáveis (HAIR JR *et al.*, 2009).

O presente trabalho tem por objetivo analisar estatisticamente os resultados de diversos ensaios realizados em dois grupos de solos: um de comportamento laterítico e outro não laterítico. Além da estatística básica descritiva, também foram utilizadas técnicas de análise multivariada de dados, como a análise de componentes principais (ACP) e a regressão linear múltipla (MLR). De forma



DOI: 10.29327/1430212.49-30

UTILIZAÇÃO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA ANÁLISE DOS PARÂMETROS
GEOTÉCNICOS DOS SOLOS TROPICAIS E PREDIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO MCT

complementar, foram analisados a efetividade dos ensaios de equivalente de areia e adsorção de Azul de Metileno para prever o comportamento nocivo da fração fina dos solos tropicais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Para realização dessa pesquisa foram utilizados 12 solos de diferentes localidades do estado de Minas Gerais. Os solos foram escolhidos de forma a constituir dois conjuntos de amostras, um de comportamento laterítico e outro de comportamento não laterítico. A Figura 1 ilustra as amostras dos solos utilizadas na pesquisa, que apresentaram grande heterogeneidade de cores. Os solos escolhidos fazem parte do banco de amostras do Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada, pertencente ao Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, e foram previamente estudados por outros autores. A Tabela 1 apresenta a descrição dos solos utilizados e os autores que trabalharam em pesquisas anteriores com esses materiais. A Figura 2 exibe um mapa de Minas Gerais e identifica as cidades nas quais os solos foram coletados.



Figura 1. Amostras dos solos de diferente coloração utilizados nessa pesquisa

Tabela 1. Identificação, descrição, local de coleta e pesquisa de origem das doze amostras de solos

Identificação	Descrição	Cidade (localidade)	Pesquisa de origem
S1	Laterita argilosa verm. amarela	Monte Alegre (Rural)	Oliveira (2023)
S2	Areia argilosa vermelha	Monte Alegre (Urbano)	Oliveira (2023)
S3	Silte argiloso verm. amarelo	Ouro Branco	Mendonça (2020)
S4	Latossolo vermelho amarelo 1	Esmeraldas	Silva (2019)
S5	Latossolo vermelho amarelo 2	Betim	Silva (2019)
S6	Podzólico vermelho amarelo 1	Juatuba	Silva (2019)
S7	Podzólico vermelho amarelo 2	Ribeirão das Neves	Silva (2019)
S8	Argiloso laterítico marrom	Ouro Preto (Antônio Pereira)	Couto (2020)
S9	Argiloso laterítico vermelho	Congonhas	Couto (2020)
S10	Latossolo vermelho amarelo 3	Mariana (Camargos)	Baudson (2023)
S11	Silte amarelo horizonte C	Ouro Preto (S. Antônio do Leite)	Hernandez (2020)
S12	Saprólito cinza intemperizado	Ouro Preto (Saramenha)	Magalhães (2022)

Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica (análise granulométrica, massa específica real dos grãos e limites de consistência) foram obtidos das pesquisas de origem dos solos, cujos autores estão indicados na Tabela 1. Os parâmetros c' , d' e P_i para a classificação MCT das amostras também foram retirados dos trabalhos citados, à exceção dos solos S11 e S12, cujos autores não realizaram a classificação MCT. Para esses dois solos foram executados os ensaios de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão, conforme a norma DNIT – ME 258 (DNIT, 2023a), e realizada a classificação MCT, segundo a norma DNIT – CLA 259 (DNIT, 2023b). A fim de sintetizar a apresentação do banco de dados dos solos, todos os resultados utilizados nas análises estatísticas



serão apresentados na próxima seção (Tabela 2), incluindo os que foram obtidos especificamente para essa pesquisa e aqueles oriundos de trabalhos anteriores.

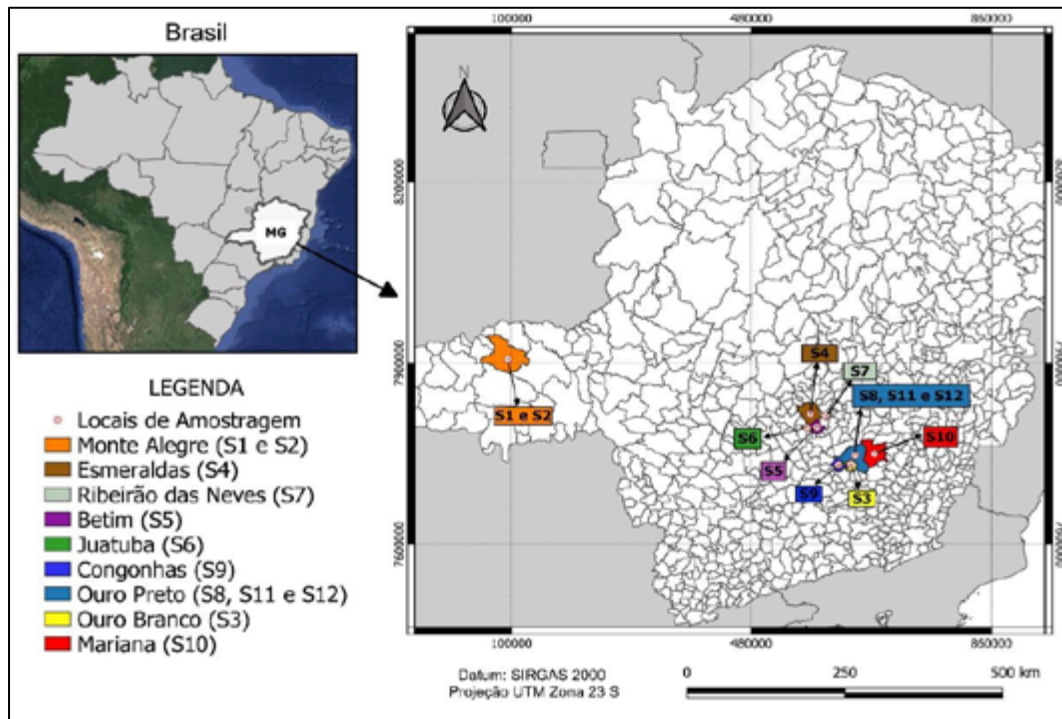


Figura 2. Localização das amostras de solo

Métodos

Os métodos experimentais aplicados nessa pesquisa podem ser divididos em três etapas principais: i) seleção das amostras de solo e levantamento dos dados existentes; ii) execução dos ensaios geotécnicos em laboratório para obtenção dos dados complementares dos solos (incluindo o equivalente de areia e a adsorção do Azul de Metileno); iii) análises estatísticas do banco de dados das doze amostras de solo.

Ensaio de Laboratório (2ª etapa)

Além dos ensaios necessários para a classificação MCT dos solos S11 e S12, foram executados os ensaios de equivalente de areia (EQA) e adsorção de Azul de Metileno para todas as amostras. O ensaio de EQA é tipicamente realizado para analisar a relação volumétrica entre as partículas de tamanho argila (finos plásticos e material pulverulento) e a fração grossa (areia e pedregulho) presentes nos solos e agregados utilizados na pavimentação. A norma DNIT 141/2022 exige que os materiais tenham EQA maior que 30% quando os limites de consistência do material forem ultrapassados, no caso de dimensionamento de base pelo método empírico. O mesmo limite é exigido para solos finos lateríticos, conforme a norma DNIT 098/2007. Nesse estudo, o ensaio de EQA foi realizado para cada uma das doze amostras, em triplicata, adotando a média dos resultados, conforme o procedimento normativo DNER – ME 054 (DNER, 1997).

O ensaio de adsorção de Azul de Metileno visa analisar a atividade da fração argila, que representa a nocividade que essa fração pode apresentar quando utilizada em obras geotécnicas. As partículas de



DOI: [10.29327/1430212.49-30](https://doi.org/10.29327/1430212.49-30)

UTILIZAÇÃO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA ANÁLISE DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS TROPICAIS E PREDIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO MCT

solo com maior atividade, nocividade ou expansão, ou ainda maior contaminação com matéria orgânica, possuem maior potencial de adsorção do corante. O efeito contrário é apresentado por partículas não nocivas e de estrutura não expansiva (FABBRI, 1994; AASHTO, 2019).

Os ensaios realizados nessa pesquisa foram executados de acordo com o método da mancha, conforme apresentado na norma T 330-07 (AASHTO, 2019). O resultado do ensaio de adsorção do Azul de Metileno pode ser expresso pelo Valor de Azul (V_a), em miligrama do soluto (Azul de Metileno) por grama de solo passante na peneira #200 (0,075 mm), ou pelo coeficiente de atividade (CA) da fração argila, calculado pela razão entre o V_a e a porcentagem de argila presente no solo.

Análises de Estatística Multivariada (3ª etapa)

Nesse estudo, foram utilizadas as técnicas de análise de componentes principais (ACP) e regressão linear múltipla (RLM) para análise dos dados. A ACP tem por objetivo condensar as informações contidas em várias variáveis (medidas) em um conjunto menor de variáveis estatísticas, expressas pelos fatores, com perda mínima de informação.

Já a RLM é uma técnica que permite prever a resposta de uma variável dependente em relação às medidas de duas ou mais variáveis independentes do banco de dados. O processamento é geralmente realizado por meio do estimador dos mínimos quadrados, que minimiza a soma dos quadrados dos resíduos da regressão, maximizando o grau de ajuste do modelo aos dados medidos. Nessa pesquisa, a RLM foi realizada para predição da classificação MCT dos solos tropicais. Para tanto, diversos modelos foram gerados a fim de obter os valores de c' e e' , sendo adotado aquele que apresentaram os maiores coeficientes de determinação (R^2) e R^2 ajustado.

Além da ACP e RLM, outras ferramentas estatísticas foram utilizadas, incluindo a estatística básica descritiva dos dados. A sequência de operações estatísticas compreendeu as ferramentas de *bloxplot* e histograma das variáveis, matriz de correlação e covariância dos dados (com verificação da dispersão com *scatter plot*) e teste de esfericidade de Bartlett (para verificar a existência de correlação suficiente para aplicação das técnicas). Para aplicação da técnica de ACP, as variáveis foram reduzidas de 20 para 11, tornando o número de variáveis menor que o número de medidas (12 solos). Posteriormente, foram gerados os modelos de RLM, avaliados pelo teste de significância ANOVA, linearidade dos dados, homoscedasticidade e normalidade dos resíduos.

As análises foram realizadas com o software Rstudio, versão 2023.12.1, (R Core Team, 2024), sendo um software livre de ambiente de desenvolvimento integrado e linguagem R, que possui um conjunto de ferramentas voltadas para cálculos estatísticos e geração de gráficos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resultados dos Ensaio Geotécnicos e Banco de Dados

O conjunto de dados das doze amostras de solos utilizadas está apresentado na Tabela 2. Ressalta-se que os dados referentes aos coeficientes c' , d' , P_i e e' dos solos S11 e S12, bem como o EQA, Vol. Azul, V_a e CA de todos os solos, foram obtidos por ensaios realizados especificamente para esse trabalho. Todos os demais dados foram obtidos dos trabalhos citados na Tabela 1. As identificações das variáveis foram simplificadas para facilitar o tratamento no Rstudio e, para melhor compreensão, estão discriminados na Tabela 3.

Alguns dos solos utilizados, principalmente os de caráter não laterítico, não possuem plasticidade (LP) e não possuem liquidez (LL) determinável pelo aparelho de Casagrande. Para fins geotécnicos, esses solos são denominados não líquidos (NL) e não plásticos (NP). Entretanto, para que fosse



possível realizar as análises estatísticas das medidas, foi necessário atribuir valor 0 às variáveis LL, LP e IP das amostras que não possuíam valores numéricos definidos.

Tabela 2. Banco de dados de ensaios geotécnicos dos doze solos utilizados na pesquisa

ID	Ped	Agr	Ame	Afi	Are	200	Sil	Arg	Gs	LL
S1*	41,4	9,2	4,6	28,5	39,7	18,9	4,1	12,2	2,537	23
S2*	0,0	0,0	0,0	74,8	74,8	25,2	8,3	6,5	2,682	23
S3**	0,5	3,2	12,1	5,3	20,6	78,8	43,7	35,2	2,710	58
S4*	2,0	3,0	16,0	13,0	32,0	68,3	14,0	52,0	2,652	59
S5**	0,0	7,0	33,0	23,0	63,0	38,4	20,0	17,0	2,687	0
S6*	20,0	2,0	4,0	6,0	12,0	68,8	20,0	48,0	2,705	48
S7**	0,0	7,0	30,0	25,0	62,0	39,6	23,0	15,0	2,662	0
S8*	1,2	5,2	11,8	8,0	25,0	75,6	10,0	63,8	2,997	30
S9*	0,7	3,4	8,8	7,0	19,2	83,5	7,6	72,5	2,782	57
S10*	1,0	0,5	11,5	6,0	18,0	82,0	15,5	65,5	2,757	68
S11**	0,0	0,8	11,7	13,5	26,0	76,0	60,0	14,0	2,578	44
S12**	27,3	0,7	9,0	14,5	24,2	51,5	39,7	8,8	2,884	40
ID	LP	IP	c	d	Pi	e	EQA	Vol.Azul	Va	CA
S1*	15	8	0,92	27,59	45,0	1,06	17	5,70	1,08	8,83
S2*	16	7	0,74	40,35	81,0	1,09	9	15,35	4,53	69,66
S3**	0	0	1,23	40,50	270,5	1,47	1	8,50	6,70	19,03
S4*	31	18	2,26	47,67	30,0	0,90	2	9,00	6,15	11,82
S5**	0	0	1,21	20,53	116,0	1,29	10	6,20	2,38	14,02
S6*	13	10	1,94	27,50	60,0	1,10	2	9,50	6,54	13,62
S7**	0	0	1,15	8,48	160,0	1,58	16	9,50	3,76	25,09
S8*	21	9	2,17	129,05	5,0	0,59	16	1,25	0,94	1,48
S9*	33	24	2,07	19,64	40,1	1,12	7	6,95	5,80	8,00
S10*	35	33	2,31	25,00	5,0	0,95	3	9,25	7,58	11,58
S11**	0	0	1,13	6,20	326,0	1,86	2	7,75	5,89	42,06
S12**	0	0	0,92	9,82	302,0	1,72	12	3,00	1,54	17,55

*: solos de comportamento laterítico; **: solo de comportamento não laterítico.

Tabela 3. Descrição das variáveis

Nº Variável	Variável	Descrição	Nº Variável	Variável	Descrição
1	Ped	Fração de pedregulho (%)	11	LP	Limite de Plasticidade (%)
2	Agr	Fração de Areia Grossa (%)	12	IP	Índice de Plasticidade (%)
3	Ame	Fração de Areia Média (%)	13	c	Coefficiente de argilosidade c' - MCT
4	Afi	Fração de Areia Fina (%)	14	d	Coefficiente de compactação d' - MCT
5	Are	Fração de Areia (%)	15	Pi	Perda de massa por imersão (%)
6	200	Fração passante na peneira #200 - 0.075mm (%)	16	e	Coefficiente de laterização e' - MCT
7	Sil	Fração de silte - 0.06mm (%)	17	EQA	Equivalente de Areia (%)
8	Arg	Fração de Argila - 0.002mm (%)	18	Vol. Azul	Miligrama de Azul de Metileno consumido por grama de solo passante #200 (mg/g)
9	Gs	Massa específica real dos grãos (g/cm³)	19	Va	Miligrama de Azul de Metileno consumido por grama de solo (mg/g)
10	LL	Limite de Liquidez (%)	20	CA	Coefficiente de atividade da fração argila (mg/g*%Arg)

DOI: [10.29327/1430212.49-30](https://doi.org/10.29327/1430212.49-30)

UTILIZAÇÃO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA ANÁLISE DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS TROPICAIS E PREDIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO MCT

Embora os parâmetros c' , d' , P_i e e' da classificação MCT tenham sido analisados, a classificação em si não foi utilizada, por não se tratar de um dado numérico. Os solos S1 e S2 são arenosos lateríticos (LA'), os solos S4, S6, S8, S9 e S10 são argilosos lateríticos (LG'), o solo S5 é arenoso não laterítico (NA') e os solos S3, S7, S11 e S12 são siltosos não lateríticos (NS'). Dessa forma, o conjunto de dados é composto por sete solos de comportamento laterítico e cinco não laterítico.

Os dados da Tabela 2 mostram que os solos utilizados apresentaram heterogeneidade nos parâmetros. O percentual de argila variou de 6,5 a 65,5 %, enquanto o índice de plasticidade variou de não plástico a 33%. Estabelecer regressões com um conjunto de solos heterogêneos favorece a replicação dos modelos para diversos tipos de solos, não restringindo a materiais de comportamento semelhante.

Os resultados do ensaio de EQA foram abaixo de 30%, para todas as amostras, variando de 1 a 17% e com média de 8%. Nota-se, para o resultado do EQA, que os baixos valores obtidos desqualificam os solos para uso em camada de base (mínimo de 30%), segundo as normas do DNIT, embora alguns solos lateríticos sejam de comportamento conhecidamente favorável para emprego na pavimentação. Este resultado corrobora as análises realizadas por Oliveira *et al.* (2023), que demonstraram a ineficácia do ensaio de EQA para analisar os solos tropicais.

Por outro lado, os resultados do ensaio de Azul de Metileno mostraram-se mais coerentes com o comportamento dos solos. Maiores coeficientes de atividade (CA) da fração argila estão associados a solos de comportamento não laterítico, à exceção do S2, que é um solo laterítico com alta porcentagem de areia.

Análises Estatísticas

Para o conjunto de dados, foram geradas as matrizes de covariância e correlação entre as vinte variáveis numéricas. As componentes obtidas a partir da matriz de covariâncias são influenciadas pelas variáveis de maior variância, sendo recomendado a análise da matriz de correlações quando as variáveis são muito heterogêneas. Conforme já discutido anteriormente, o conjunto de dados é heterogêneo e os valores podem variar de unidades, como o coeficiente c' , a centenas de unidades, como o P_i .

A Figura 3 apresenta o *boxplot* das variáveis padronizadas pela média e desvio-padrão. Em cada variável, os traços inferiores e superiores indicam os valores mínimos e máximos, desconsiderando os *outliers*, que são indicados pelos círculos vazios. O início e o fim da caixa indicam o primeiro e o terceiro quartis, que delimitam os valores 25% e 75% menores. O traço de maior espessura dentro da caixa é a mediana dos dados, ou segundo quartil, que separa os valores 50% menores dos 50% maiores.

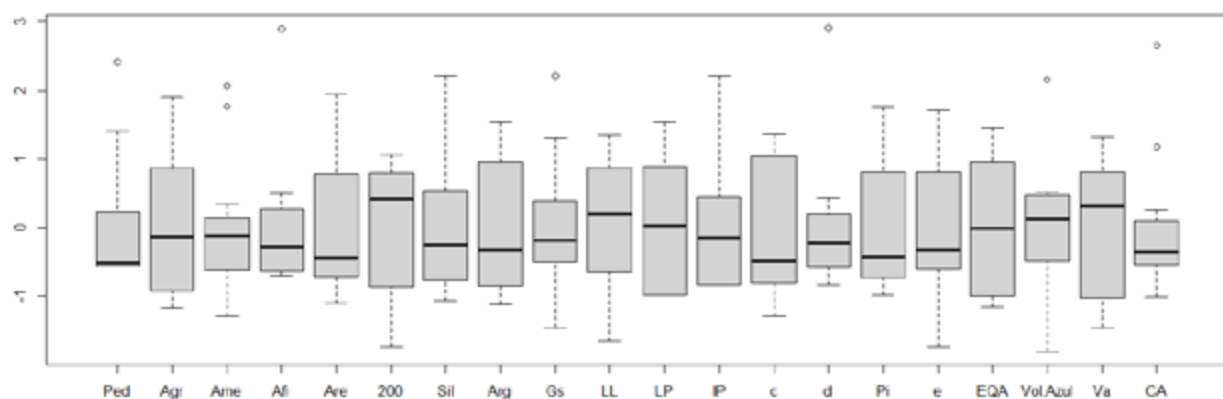


Figura 3. *Boxplot* das variáveis padronizadas



Whilson M. Mendonça, Felício G. Oliveira,
 Geraldo L. O. Marques, Diogo R. S. Baudson,
 Marco Antônio G. Antunes & Gustavo F. Teixeira

Algumas variáveis como “200”, “c”, “EQA” e “Va” possuem alta dispersão dos dados. A maioria das variáveis possuem distribuição assimétrica dos dados, com a mediana tendendo ao primeiro ou ao terceiro quartil. Algumas variáveis apresentaram valores discrepantes (*outliers*), identificados acima ou abaixo do limite de detecção. Os *outliers* detectados foram mantidos no banco de dados, pois eles refletem as características das amostras de solo e são importantes para avaliar as propriedades heterogêneas.

Os gráficos de dispersão (*scatter plot*), apresentados abaixo da diagonal principal da matriz exibida na Figura 4, mostram a tendência de relação entre as variáveis descritas na própria diagonal principal. Essa tendência é expressa numericamente pelas correlações entre as variáveis dispostas acima da diagonal principal. O coeficiente de correlação (Pearson – r) mede o grau pelo qual duas variáveis aleatórias tendem a mudar juntas, em correlação linear. Os valores variam de -1 a 1, sendo que os valores negativos indicam correlação inversa.

Quanto à magnitude dos valores, é comum entender que coeficientes de correlação menores que 0,30 são fracos ou pequenos, enquanto valores maiores são moderados a fortes. Algumas fortes correlações apresentadas são óbvias, devido ao próprio cálculo da variável, como o LP e IP, que apresentaram correlação de 0,95. De maneira análoga, as variáveis “200” e “Arg” também apresentaram forte correlação (0,77).

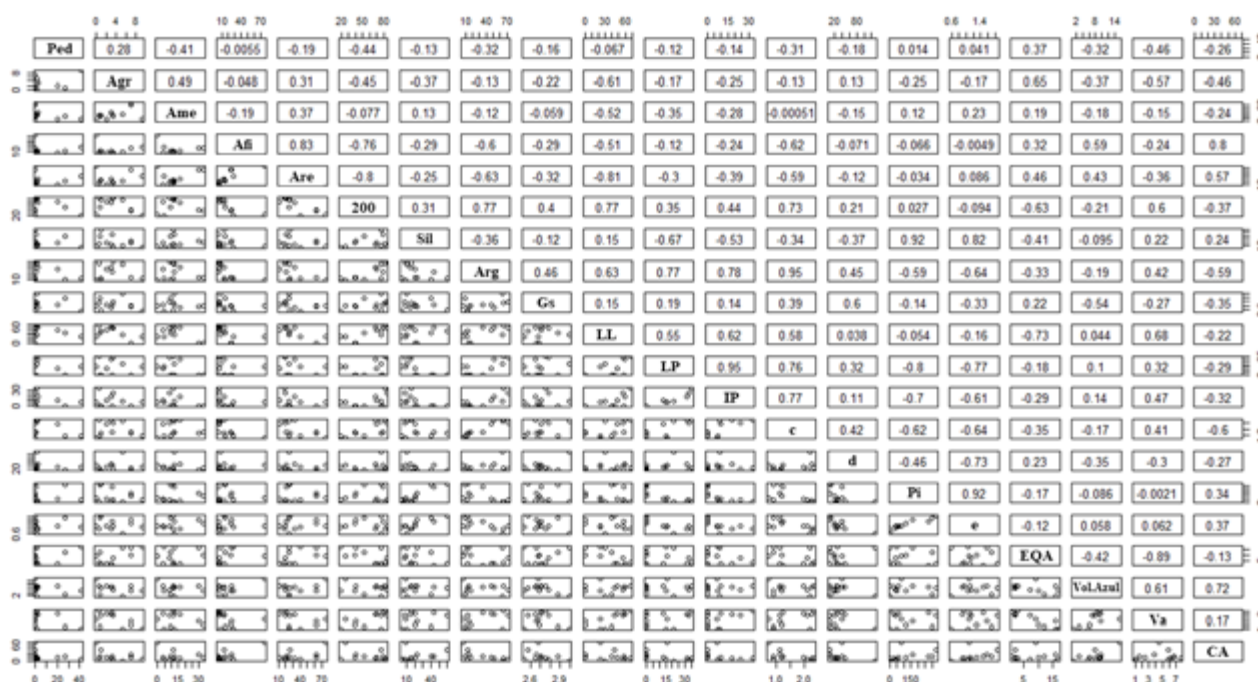


Figura 4. Gráficos de dispersão (*scatter plot*) e matriz de correlação das variáveis

Entretanto, outras correlações altas indicam boas evidências a serem interpretadas. O coeficiente c’ (MCT) apresentou correlação de 0,95 com a porcentagem de argila. Esse dado vai ao encontro da teoria proposta pelos criadores da metodologia MCT, pois o c’ é um coeficiente que explica a argilosidade do solo. De forma similar, o Pi apresentou correlação de 0,92 com “Sil”, ratificando a associação entre a perda de massa por imersão e falta de coesão dos materiais siltosos.



DOI: 10.29327/1430212.49-30

UTILIZAÇÃO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA ANÁLISE DOS PARÂMETROS
GEOTÉCNICOS DOS SOLOS TROPICAIS E PREDIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO MCT

Ainda analisando os coeficientes da classificação MCT, o e' apresentou baixa correlação com a porcentagem de areia (0,086), alta correlação positiva com a porcentagem de silte (0,82) e boa correlação negativa com a porcentagem de argila (-0,64). Esses valores sugerem que o índice de laterização do solo está mais relacionado às frações finas, que incluem os argilominerais e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, do que às frações grossas, que geralmente incluem fragmentos de rocha e grãos estáveis de quartzo.

Para execução da análise de componentes principais (ACP) o número de variáveis foi reduzido de 20 para 11, excluindo as variáveis que são calculadas a partir de outras. As variáveis mantidas foram: Are, Sil, Arg, GS, LL, LP, c, d, Pi, EQA e Va. O teste de Bartlett apresentou p.valor menor que 0,05 ($1,93E^{-6}$), possibilitando a aplicação das técnicas multivariadas.

A Tabela 4 apresenta as medidas de cada componente principal (CP). A CP1 é responsável pela explicação de 43,7% da variância dos dados, enquanto a soma das três primeiras CPs, retidas pelo critério de *Kaiser* (autovalor maior que 1), explica 87,4% do conjunto de dados. Dessa forma, o conjunto de variáveis analisadas dos solos podem ser reduzidas em três componentes principais, explicando 87,4% da variabilidade das propriedades.

Tabela 4. Medidas estatísticas resultantes da ACP

Medida	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11
Desvio padrão	2,192	1,793	1,264	0,711	0,588	0,541	0,330	0,285	0,179	0,116	0,054
Proporção da variância explicada	0,437	0,292	0,145	0,046	0,031	0,027	0,010	0,007	0,003	0,001	0,000
Proporção acumulada	0,437	0,729	0,874	0,920	0,952	0,978	0,988	0,996	0,999	1,000	1,000

A Figura 5 apresenta os gráficos *Scree Plot* e *Biplot* obtidos com as análises. O primeiro mostra a variância explicada para cada componente principal, em que a linha vermelha delimita o autovalor igual a 1, resultando na retenção de 3 componentes principais, destinadas a redução a dimensionalidade dos dados. O *Biplot* exibe as observações (números de 1 a 12) e as variáveis (vetores) no espaço, considerando as duas primeiras componentes principais. É possível perceber a sobreposição dos vetores “Arg” e “c” com grande influência no CP1. Já as variáveis “EQA” e “Sil”, apresentaram maior influência na CP2, porém em direções opostas. As demais variáveis mostraram influência significativa tanto na CP1 quanto na CP2.

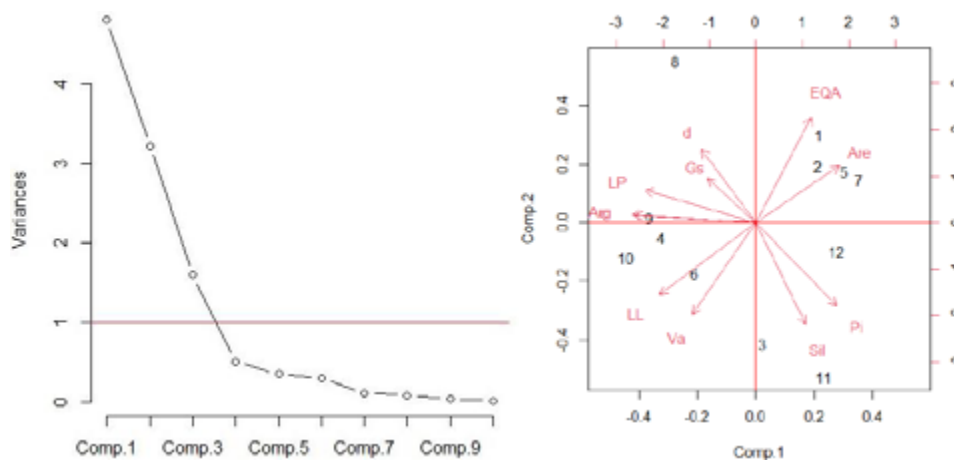


Figura 5. Análise de Componentes Principais: i) à esquerda, *Scree plot* e critério de *Kaiser*; ii) à direita, *Biplot* dos escores para CP1 e CP2



Após verificação da possibilidade de redução da dimensionalidade dos dados, foi dada sequência às técnicas de análise multivariada, sendo gerados uma série de modelos para previsão dos parâmetros da classificação MCT pela RLM, a partir das outras variáveis. Inicialmente, foram gerados modelos para previsão dos coeficientes c' , d' e P_i . Entretanto, considerando os coeficientes de determinação calculados, percebeu-se que eliminar os modelos para prever o d' e P_i e gerar um único modelo para previsão do e' foi mais efetivo, visto que o e' é calculado a partir desses dois.

Dentre os modelos gerados, foram adotados aqueles que apresentaram os maiores coeficientes de determinação (R^2) e R^2 ajustado pelo número de variáveis. O modelo para previsão do c' é representado pela Equação 1, cujo R^2 foi igual a 0,915 e o R^2 ajustado igual a 0,844. Foram utilizadas 5 variáveis, sendo as variáveis Arg e Va associadas às maiores cargas multiplicativas.

Já a Equação 2, representa o modelo de previsão do e' , que utilizou 6 variáveis para obter um melhor coeficiente de determinação, cujo R^2 foi de 0,863 e o R^2 ajustado igual a 0,698. Em nenhum dos dois modelos o EQA contribuiu para melhoria do ajuste. Já os parâmetros Va e CA tiveram comportamento contrário, contribuindo para melhor acurácia do modelo e confirmando que o ensaio de EQA explica menos o comportamento dos solos tropicais em relação ao ensaio de adsorção de Azul de Metileno.

$$c' = 1,157 - 7,238E^{-3} * Are + 1,810E^{-2} * Arg - 8,991E^{-3} * LL + 9,954E^{-3} * LP + 4,092E^{-2} * Va \quad (1)$$

$$e' = 1,614 + 1,183E^{-2} * Sil - 5,546E^{-3} * Arg - 1,469E^{-1} * Gs - 2,012E^{-2} * LP + 2,365E^{-2} * IP + 2,949E^{-5} * CA \quad (2)$$

Embora o teste ANOVA tenha indicado significância (p .valor $< 0,05$) apenas para duas variáveis de cada modelo, as demais foram mantidas por aumentarem o coeficiente de determinação R^2 . Por meio da análise gráfica dos resíduos, foi verificada a homoscedasticidade, ou seja, a dispersão dos resíduos é constante ao longo do espectro dos valores da variável independente. O teste de Shapiro apresentou p .valor de 0,313 e 0,058 para os modelos de c' e e' , respectivamente, indicando normalidade dos resíduos (valores maiores que 0,05).

A partir das Equações 1 e 2 dos modelos gerados, foram calculados os valores preditos (P) dos coeficientes c' e e' . Os valores foram inseridos no ábaco de classificação MCT (Figura 6), sendo representados por um triângulo com a descrição do respectivo solo seguido da letra "P". Os valores originais (O) obtidos pelos ensaios também foram plotados no ábaco, representados pela letra "x" mais a identificação do solo, seguido da letra "O". Dessa forma, foi possível comparar visualmente o desempenho dos modelos.

Foi observado que apenas em duas amostras (dentre as doze utilizadas) a classificação predita pelos modelos diferiu da classificação original, obtida a partir dos ensaios de laboratório, configurando uma taxa de acerto de 83%. Ainda assim, para os dois solos que os modelos não obtiveram a classificação correta (S6 e S7), a localização no ábaco ficou próxima dos valores originais, situando-se nos limites de classificação.

Sabendo que o coeficiente e' é calculado por meio de outros dois (d' e P_i) e que o P_i é altamente correlacionado com outras variáveis, a exemplo da porcentagem de silte, pode-se inferir que o coeficiente d' (calculado pela inclinação das curvas de compactação mini-MCV), apresentou baixa correlação com as variáveis adotadas. Sendo assim, sugere-se para trabalhos futuros, a inserção dos dados referentes à compactação Proctor como uma das variáveis do modelo de predição do e' na tentativa de melhorar o R^2 e assertividade na classificação MCT.



DOI: 10.29327/1430212.49-30

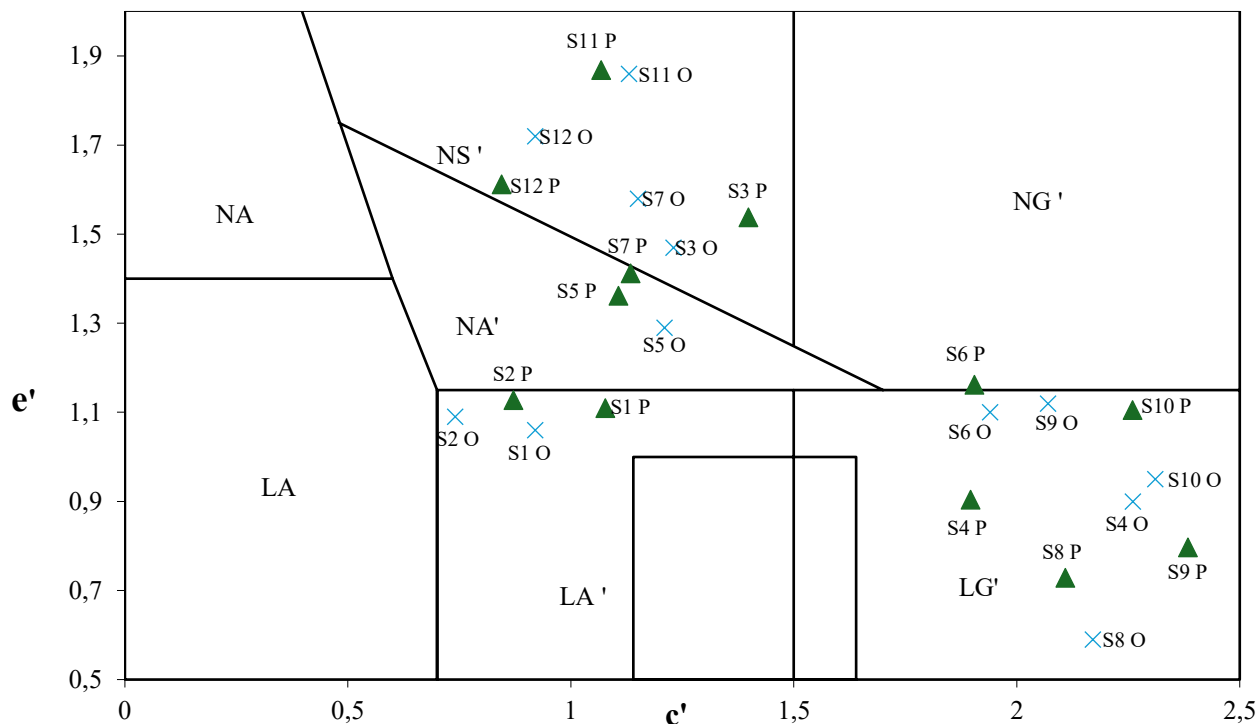
UTILIZAÇÃO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA ANÁLISE DOS PARÂMETROS
GEOTÉCNICOS DOS SOLOS TROPICAIS E PREDIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO MCT

Figura 6. Classificação MCT das amostras de solo por meio dos dados de ensaios (O) e por meio dos modelos estatísticos preditivos dos coeficientes c' e e' (P)

CONCLUSÕES

As análises estatísticas evidenciaram uma baixa relação do ensaio de equivalente de areia com os parâmetros da classificação MCT, ao passo que os dados do ensaio de adsorção de Azul de Metileno tiveram melhor desempenho. Tais resultados indicam que a utilização dos parâmetros do ensaio de Azul de Metileno para analisar o comportamento da fração fina dos solos tropicais é mais efetivo que o ensaio de equivalente de areia.

A análise das correlações entre as variáveis indicou alta relação entre o coeficiente de argilosidade (c') e a porcentagem de argila, bem como entre o P_i e a porcentagem de silte, ratificando a metodologia MCT. Entretanto, não foi possível obter alta correlação entre o d' e as outras variáveis utilizadas.

A análise de componentes principais (ACP) mostrou que o conjunto de variáveis analisadas das amostras de solo podem ser reduzidas em três componentes principais, explicando cerca de 87,4% da variabilidade dos dados. Considerando que as análises geotécnicas envolvem muitos ensaios e parâmetros, a utilização de técnicas estatísticas para tomada de decisão se apresenta com uma alternativa relevante, pois, como evidenciado nesta pesquisa, muitas variáveis podem ser reduzidas em poucas componentes para explicar as propriedades.

Utilizando a técnica de regressão linear múltipla (RLM), foram gerados modelos preditivos que apresentaram uma assertividade de 83% na classificação MCT dos solos utilizados, com desvio de classificação apenas em solos cuja disposição gráfica estava no limite dos quadrantes. Embora o estudo tenha utilizado um banco de amostras com solos de comportamento heterogêneo, o número de amostras (12) ainda é limitado, demandando estudos futuros com um maior número de amostras, permitindo assim ampliar a precisão dos modelos e aplicar em diferentes situações



AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Universidade Federal de Ouro Preto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. Standard Method of Test for The Qualitative Detection of Harmful Clays of the Smectite Group in Aggregates Using Methylene Blue. T 330-07. Washington D.C, USA, 2019.

Balbo, J. T. Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BAUDSON, D. R. S. Análise geotécnica da erodibilidade do rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão: um estudo de caso na Bacia do Rio Gualaxo do Norte. Dissertação. Prog. Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, 2023.

COUTO, B. O. C. Estudo da erodibilidade em horizontes de taludes de corte rodoviário por meio de procedimentos de laboratório e de campo. Tese. Prog. Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, 2020.

DNER. Equivalente de areia. Rio de Janeiro: DNER-ME 054/97: 1997.

DNIT. Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico. Rio de Janeiro: DNIT 098/2007- ES: 2007.

_____. Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura. Brasília: DNIT-CLA 259/2023: 2023b.

_____. Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão: Brasília: DNIT-ME 258/2023: 2023a.

FABBRI, G. T. P., Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de Azul de Metileno. 1994. 162 f. Tese de Doutorado. USP, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1994.

HAIR JR, J. F. *et al.* Análise multivariada de dados [recurso eletrônico]. 6ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HERNANDEZ, Y. M. R. Influência da sazonalidade climática na estabilidade de taludes em voçorocas no Complexo Metamórfico do Baçõ. Prog. Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, 2020.

MAGALHÃES, T. P. Avaliação geotécnica de solos compactados para recuperação do aterro controlado de Ouro Preto, MG. TCC: Engenharia Civil. UFOP, 2022.

MENDONÇA, W. M. Estabilidade de taludes em solo não saturado. TCC: Engenharia Civil. UFSJ, 2020.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D.F., Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos, São Paulo: Editora Villibor, 1995.

OLIVEIRA, F. G. Estudo da estabilização granulométrica de lateritas com uso de solos do triângulo mineiro. Tese. Prog. Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, 2023.

OLIVEIRA, F. G. *et al.* Linear shrinkage and the methylene blue spot test in the analysis of plasticity of granulometrically stabilized laterites. REM - International Engineering Journal, Fundação Gorceix, v. 76(3), p. 255–263, 2023.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

SILVA, B. O. Estudo comparativo entre metodologias de classificação e caracterização mecânica de solos da Região Metropolitana de Belo Horizonte para fins rodoviários. Dissertação. Prog. Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, 2019.

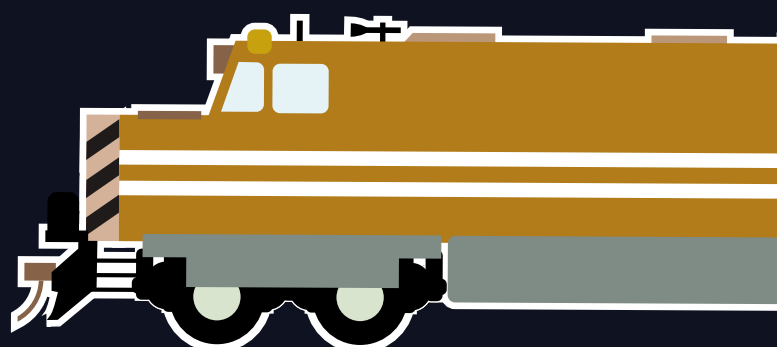


26° Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br



ABDER



**ESTABILIZAÇÃO DE
MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO**

PROGRAMAÇÃO
TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS E ESTUDOS DE CASOS DE OBRAS
Quinta-feira, 22 de agosto

SALA TERRA CAÍDA		
ESTABILIZAÇÃO DE MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO (ST10)		
⌚ 09:00	TT945	ANÁLISE DO ESTABILIZANTE DYNABASE® PARA REAPROVEITAMENTO DE SOLO LOCAL – UM ESTUDO DE CASO APLICADO AO SISTEMA VIÁRIO DE UM SHOPPING CENTER NO MUNICÍPIO DE LAGARTO/SE
⌚ 09:20	EC341	AVALIAÇÃO DO FOSFOGESSO DE UBERABA COMO ESTABILIZAÇÃO DE SOLO
⌚ 09:40	TT614	ESTUDO DA VARIAÇÃO DO PH AO LONGO DO TEMPO EM DOIS SOLOS DO DISTRITO FEDERAL MELHORADOS COM CAL
⌚ 10:20	TT478	MELHORIA DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS A PARTIR DA TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS COM FIBRAS NATURAIS DE AÇAÍ E COCO
⌚ 10:40	TT849	ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA TRAÇÃO A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BGTC
⌚ 11:00	TT183	AVALIAÇÃO MECÂNICA DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO CONTENDO FIBRA DE POLIPROPILENO MULTIFILAMENTO
⌚ 11:20	TT262	INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRA DE POLIPROPILENO NO DESEMPENHO MECÂNICO DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO
⌚ 12:00	EC967	ANÁLISE DO USO DA FIBRA DE PVA EM PAVIMENTO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND



ANÁLISE DO ESTABILIZANTE *DYNABASE*® PARA REAPROVEITAMENTO DE SOLO LOCAL – UM ESTUDO DE CASO APLICADO AO SISTEMA VIÁRIO DE UM *SHOPPING CENTER* NO MUNICÍPIO DE LAGARTO/SE

*Tayná Macêdo Rito de Santana*¹; *Levy Pablo Silva Garcia*²; *José Victor Rodrigues Pinto*²; *Franklin José Rodrigues Amorim*²; *Joelson hora Costa*²; *Victor Manuel de Queiroz Lourenço*² & *Camilla Maria Torres Pinto*³

RESUMO

Um dos grandes desafios da infraestrutura urbana é a escassez de solos provenientes de jazidas naturais com alta capacidade de suporte. Além disso, os custos elevados de transportes devido as distâncias entre as jazidas e as obras. Estudos envolvendo a reutilização de solo local após o processo de estabilização, em diferentes nichos de mercado, se mostram cada vez mais necessários diante do grande passivo ambiental causado pelo acúmulo de bota-fora, resíduos gerados em grandes volumes. O objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho geotécnico de um solo caracterizado como silte argiloso e estabilizado quimicamente, empregando-se a adição de 3% e 6% de *Dynabase*®, em massa, ao solo puro encontrado no sistema viário de um *shopping center* no município de Lagarto/SE, visando-se a aplicação em camadas de base e sub-base. Os resultados apresentaram aumento em cerca de cinco vezes nos valores de ISC das misturas solo-*Dynabase*®. Concluiu-se ainda que a adição do estabilizante tornou o solo apto para utilização no sistema viário do *shopping center*, contudo apenas para a camada de sub-base. Além disso, fez com que não houvesse mais a necessidade de agregar valor com transporte de bota-fora e importação para substituição de material, tendo em vista um passivo sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Solo; Propriedades Geotécnicas; *Dynabase*®; Estabilização; Pavimentação.

ABSTRACT

One of the great challenges of urban infrastructure is the scarcity of soil from natural deposits with high support capacity. Furthermore, high transport costs due to the distances between the deposits and the works. Studies involving the reuse of local soil after the stabilization process, in different market niches, are increasingly necessary given the great environmental liability caused by the accumulation of waste, waste generated in large volumes. The objective of this work was to analyze the geotechnical performance of a soil characterized as silty clay and chemically stabilized, using the addition of 3% and 6% of *Dynabase*®, by mass, to the pure soil found in the road system of a shopping mall in municipality of Lagarto/SE, aiming at the application in base and sub-base layers. The results showed a fivefold increase in the ISC values of the soil-*Dynabase*® mixtures. It was also concluded that the addition of the stabilizer made the soil suitable for use in the shopping center road system. In addition, it meant that there was no longer the need to spend on waste transport and imports to replace material, with a view to sustainable liabilities.

KEY WORDS: Soil; Geotechnical Properties; *Dynabase*®; Stabilization; Paving.

¹ Universidade Federal de Sergipe, taynamacedorito@gmail.com;

² Faculdade Pio Décimo, eng.levypablo@gmail.com; rodriguesvictor521@gmail.com; franklin.jramorim@gmail.com; joelsonhcosta@gmail.com; victorqlourenco@gmail.com;

³ Universidade Estadual de Santa Cruz, cmtpinto@usc.br.



Tayná Macêdo Rito de Santana,
Levy Pablo Silva Garcia, José Victor Rodrigues Pinto,
Franklin José Rodrigues Amorim, Joelson hora Costa,
Victor Manuel de Queiroz Lourenço & Camilla Maria Torres Pinto

INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da atualidade brasileira é a escassez de solos provenientes de jazidas naturais com alta capacidade de suporte. Outra problemática se dá devido as distâncias entre as jazidas e a obra, ocasionando um maior deslocamento, custos e emissão dos gases que provocam o aquecimento global (CYPRIANO *et al.*, 2019).

De acordo com a Organização Mundial das Nações Unidas, apenas um quinto dos recursos, utilizados no mundo, foram provenientes de fontes renováveis. Em virtude disso, uma das metas da Agenda de Desenvolvimento Sustentável para 2030 é o uso eficiente dos recursos naturais, devido à voracidade com que se têm consumido estes recursos (ONU, 2015).

A Agenda 2030 da ONU faz parte de um plano de desenvolvimento global para atingir em 2030 um melhor mundo para todos os povos e nações. Com isso, destaca-se que existem 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que devem ser atingidos até 2030. O objetivo de número 9 afirma que se deve aprimorar o sistema viário do país, com foco em sustentabilidade e segurança, na busca por menor custo e melhoria na qualidade (ONU, 2015).

A reutilização do solo local surge como uma alternativa sustentável, tendo em vista o reuso do solo, menor manejo de material, redução de custos com transporte e conseqüentemente uma redução no volume de bota-fora. Para Viana (2021), a definição dos princípios dos 3Rs (redução, reuso e reciclagem) são essenciais para a implementação da Economia Circular. Ademais, a Economia Circular (EC) surge como uma forma de viabilizar o crescimento econômico com a preservação ambiental, com foco na sustentabilidade (GUINÉE *et al.*, 2021).

Dessa forma, no contexto do cenário atual brasileiro e, mais especificamente, no Estado de Sergipe, verifica-se a necessidade de analisar o uso do aditivo *Dynabase*® para se estabilizar o solo local, com o intuito de reduzir os custos de bota-fora de material e/ou confecção de mistura. Além disso, incentivar o desacumulo de resíduos ao propor uma destinação ao solo com baixa capacidade de suporte e contribuir para a Agenda 2030 da ONU, atendendo a ODS 9. Por fim, diante do exposto, esta pesquisa realizou um estudo geotécnico e uma tentativa de estabilização em um solo situado no sistema viário de um *shopping center* da cidade de Lagarto/SE.

REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2021), dados estatísticos apresentam que apenas 12,40% (203.500 km) da malha rodoviária brasileira são pavimentadas. No estado de Sergipe foram verificados apenas 653 km de rodovias - de um total de 1.848 km pavimentados, apenas 25,70 % dos pavimentos possuem classificação ótima ou bom, e 74,30% foram considerados regular, ruim ou péssimo.

Para Metcalf (1972), o solo natural é um material heterogêneo, complexo e variável. Por esse motivo, em determinado local um solo pode não atender às especificações de engenharia requeridas para o que se pretende construir. Com isso, surge a necessidade de se alterar as propriedades do solo para que atenda a determinadas especificações de engenharia e seja estabilizado.

Estabilização de solos é definida como a alteração de uma ou mais propriedades do material, com o intuito de melhorar suas características e seu comportamento do ponto de vista da engenharia (MAHASNEH, 2016). Segundo Behak (2007), a estabilização de solos resulta em pavimentos com bom desempenho e durabilidade. Com bom desempenho e durabilidade, existem diversas técnicas de estabilização, que se dividem em métodos mecânicos, físicos e químicos. Silva (2006) afirma que um dos métodos de estabilização mais utilizado na pavimentação é a estabilização química, que



DOI: [10.29327/1430212.49-36](https://doi.org/10.29327/1430212.49-36)

ANÁLISE DO ESTABILIZANTE DYNABASE® PARA REAPROVEITAMENTO DE SOLO LOCAL –
UM ESTUDO DE CASO APLICADO AO SISTEMA VIÁRIO DE UM SHOPPING CENTER NO MUNICÍPIO DE LAGARTO/SE

ocorre através da inserção de um aditivo ao solo com o intuito de obter melhorias em suas propriedades geotécnicas.

Conforme Gondim (2008), para escolher o método mais adequado de estabilização a ser utilizado deve-se considerar as propriedades do solo que precisam ser melhoradas e os propósitos aos quais se destinam o processo de estabilização, cada tipo vai se comportar de forma única, tendo suas aplicações e limites característicos para cada solicitação. Além disso, a estabilização busca a melhoria nas principais propriedades do solo, como resistência, permeabilidade e deformabilidade (OLIVEIRA, 2010).

Azevedo (2010) afirma que existem casos em que os materiais naturais que estão presentes na obra não podem ser utilizados para as camadas do pavimento. E diante disso, algumas condições devem ser avaliadas, tais como:

- a) Substituição do solo presente por um de melhor propriedade, também chamado como “Bota-fora” e “Empréstimo”;
- b) Estabilização por meios químicos e mecânicos;
- c) Reformulação de cálculos do pavimento para que fique nas condições que o local possua.

A estabilização dos solos pode ser feita por meios mecânicos, com a devida correção da granulometria e plasticidade, com adição ou subtração de certas quantidades das frações constituintes até a obtenção de parâmetros indicados para camadas de pavimentos seguindo as normas do DNIT. Além deste meio, esse processo pode usar meios químicos, como aditivos orgânicos ou inorgânicos, dentre eles, existem a cal, cimento Portland, silicato de sódio, e entre outros (GUIMARÃES, 2002).

Para Corrêa (2008), o aditivo em contato com o solo interagirá de forma particular, seja por meio de cimentação, mudanças de mineralogia, permutação de íons, polimerização, entre outros. Ademais, são de suma importância, o conhecimento da atuação da substância adicionada, bem como das características do material que será tratado para ter sucesso no processo de estabilização.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na presente pesquisa foram utilizados o solo puro, proveniente do município de Lagarto/SE, e o *Dynabase*® com o intuito de estabilização. A metodologia aplicada na pesquisa seguiu as etapas de coleta, caracterização das amostras, ensaios de caracterização para o solo puro, ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC) e análise dos resultados. Destaca-se que as amostras de solos foram armazenadas em sacos plásticos após o processo de secagem e destorroamento, prontas para serem utilizadas nos ensaios de caracterização geotécnica.

Solo e local de estudo

Para o presente trabalho utilizou-se o solo do subleito existente no local da construção do sistema viário de um *shopping center*, na Avenida Contorno, S/N, município de Lagarto – SE. Na Figura 1 é apresentada a área de estudo e condições sob as quais o solo se encontrava no dia da coleta. As amostras foram coletadas em três pontos distintos e com profundidade entre 0,00 e 0,25m com relação às cotas do greide de terraplenagem.



Tayná Macêdo Rito de Santana,
Levy Pablo Silva Garcia, José Victor Rodrigues Pinto,
Franklin José Rodrigues Amorim, Joelson hora Costa,
Victor Manuel de Queiroz Lourenço & Camilla Maria Torres Pinto



Figura 1. Área de estudo: (a) Centro Sul *Shopping Center*; (b) Coleta de Solo Puro (Autores, 2023).

Estabilizante

O estabilizante químico utilizado neste estudo foi o *Dynabase*®, cedido pela empresa *Dynabase Comércio de Produtos Estabilizantes LTDA*, localizada no município de Penápolis/SP. O *Dynabase*® possui hidróxido de cálcio aditivado, no qual, de acordo com o fabricante, pode conferir ao projeto de uma rodovia redução de 60 a 80% com custos de remoção do solo e seu respectivo transporte para bota-fora e também, com a importação de material para substituição na regularização do greide. (*DYNABASE*, 2021).

O efeito aglutinante torna as partículas mais impermeáveis para serem utilizadas como camada final de pavimento. Essas ações são realizadas no início pela absorção dos íons de cálcio pelas partículas argilosas, mudando suas características, que dependem da atividade superficial, e tendo outra ação, mais lento. Causado pelas interligações entre íons de cálcio e os componentes aluminosos e silicosos separados em meio alcalino nos solos, transformando-os em silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, estáveis com poder de cimentação das partículas (*DYNABASE*, 2021).

Segundo o fabricante, deve-se utilizar um percentual em massa de 2% a 4% do aditivo. E para evitar erros no dimensionamento do pavimento, deve-se realizar ensaios de caracterização a fim de que seja identificado um teor mais adequado para o solo em questão.

De acordo com valores encontrados na literatura, pode-se notar que misturas com 2% de *Dynabase*® resultaram melhorias significativas em seu valor de ISC, em torno de cinco vezes maior que o ISC do solo natural. Com isso, para a presente pesquisa adotou-se dois percentuais de aditivo, ou seja, 3% e 6% de *Dynabase*® adicionado ao solo puro. Destaca-se que o critério de escolha foi verificar o teor do ponto médio em relação à faixa sugerida pelo fabricante, e o efeito do uso de um maior percentual do aditivo ao solo. A Figura 2 apresenta a amostra de estabilizante utilizada na pesquisa.

O produto tem característica física sólida e coloração acinzentada, com composição química própria que permite ser depositado a céu aberto por longo período, sem que ocorra qualquer alteração na sua qualidade e sem qualquer agressão ao meio ambiente (BATISTA, 2019).



DOI: [10.29327/1430212.49-36](https://doi.org/10.29327/1430212.49-36)

ANÁLISE DO ESTABILIZANTE DYNABASE© PARA REAPROVEITAMENTO DE SOLO LOCAL –
UM ESTUDO DE CASO APLICADO AO SISTEMA VIÁRIO DE UM SHOPPING CENTER NO MUNICÍPIO DE LAGARTO/SE



Figura 2. Amostra de *Dynabase*© utilizada na presente pesquisa (Autores, 2023).

Preparação e caracterização dos materiais

Após seco ao ar livre e destorroado, procedeu-se à caracterização geotécnica do solo em estudo. A preparação das amostras foi norteada pela Norma ABNT NBR 6457:2016. A Tabela 1 apresenta os ensaios adotados na presente pesquisa.

Tabela 1. Ensaios e métodos utilizados (Autores, 2023).

<i>ENSAIOS REALIZADOS</i>	<i>MÉTODOS DE ENSAIOS</i>
Granulometria	NBR 7181:2018
Limite de Liquidez	NBR 6459:2017
Limite de Plasticidade	NBR 7180:2016
Compactação	NBR 7182:2016
Índice de Suporte Califórnia ISC	NBR 9895:2017

Para a classificação do solo foram empregados os procedimentos da TRB (*Transportation Research Board*) e a USCS (*Unified Soil Classification System*) ou SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos). Os ensaios de compactação foram realizados empregando-se a energia do Proctor Intermediário, ou seja, com aplicação de 26 golpes do soquete em cada uma das 5 camadas, no cilindro grande e com reuso de material. A Figura 3 apresenta as etapas de preparação para o ensaio de compactação.



Tayná Macêdo Rito de Santana,
Levy Pablo Silva Garcia, José Victor Rodrigues Pinto,
Franklin José Rodrigues Amorim, Joelson hora Costa,
Victor Manuel de Queiroz Lourenço & Camilla Maria Torres Pinto



Figura 3. Compactação das misturas: (a) Solo + *Dynabase*®; (b) Umedecimento e homogeneização da amostra; (c) Compactação (Autores, 2023).

Com os dados obtidos no ensaio de compactação, o peso específico aparente seco máximo (γ_d) e a umidade ótima ($w_{ót}$), foram moldados corpos de prova para os ensaios de expansão e capacidade de suporte do solo, o Índice de Suporte Califórnia (ISC). A Tabela 2 mostra a nomenclatura dos materiais usados nesta pesquisa.

Tabela 2. Materiais e siglas adotados (Autores, 2023).

MATERIAL	SIGLA
Solo Puro	SP
Solo Puro + 3% <i>Dynabase</i> ®	3DNB
Solo Puro + 6% <i>Dynabase</i> ®	6DNB

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dos ensaios de granulometria, foi possível classificar o solo puro e obter-se a sua curva granulométrica. O solo compõe-se de 38% de material fino, passante na peneira N^o. 200 (0,074 mm). Com a utilização da NBR 6502 (ABNT, 1995) foram determinados os percentuais de pedregulho, areias grossa, média e fina, além da fração de silte e argila, levando em consideração as faixas estabelecidas por essa norma. As porcentagens de pedregulho (34%), areia (28%), silte e argila (38%), seguiram a escala granulométrica estabelecida na ABNT NBR 6502 (1995). Com isso, o solo foi classificado como silte argiloso com pouca areia e vestígios de pedregulhos. A Figura 4 a seguir apresenta a curva granulométrica obtida na presente pesquisa.



DOI: 10.29327/1430212.49-36

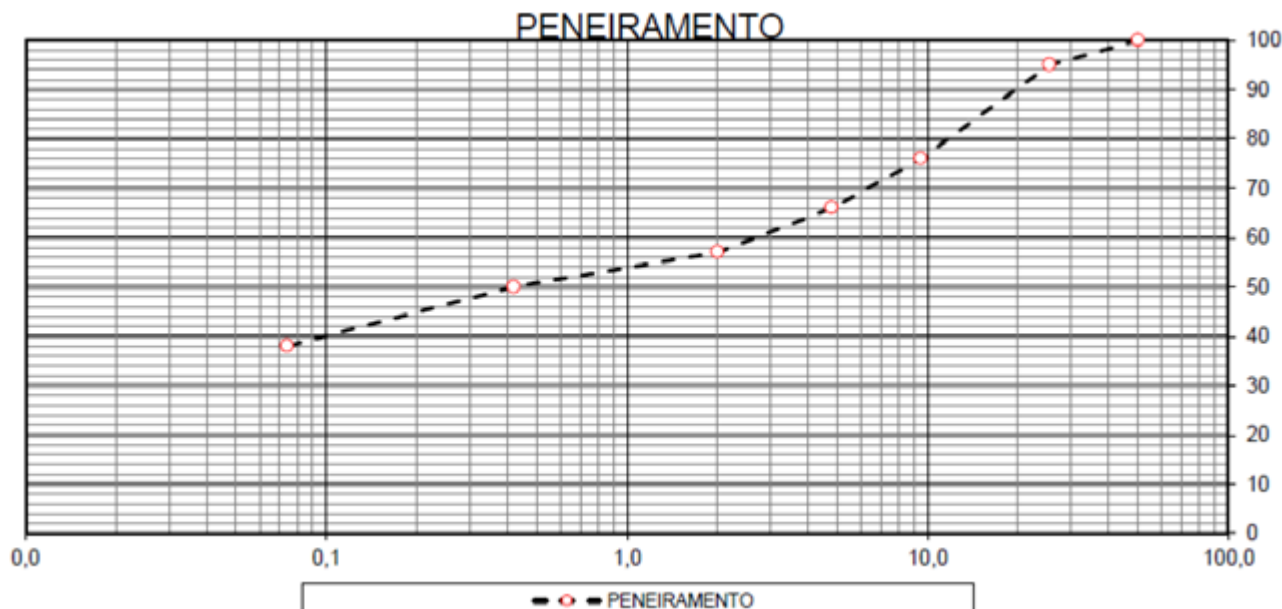
ANÁLISE DO ESTABILIZANTE DYNABASE© PARA REAPROVEITAMENTO DE SOLO LOCAL –
UM ESTUDO DE CASO APLICADO AO SISTEMA VIÁRIO DE UM SHOPPING CENTER NO MUNICÍPIO DE LAGARTO/SE

Figura 4. Curva granulométrica do solo puro: porcentagem de solo passante versus diâmetro das peneiras (Autores, 2023).

Os ensaios de Limites de Consistência revelaram que o solo possui um limite de liquidez (LL) de 25%. Já o limite de plasticidade (LP) determinado para o solo puro foi de 16%, resultando num índice de plasticidade (IP) de 8%.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo analisado pode ser classificado como argila siltosa com baixa compressibilidade (CL – ML). Para a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), o solo em estudo é predominantemente siltoso do grupo A-4, ou seja, a porcentagem de material que passa na peneira nº 200 é maior que 35%, e com Índice de Grupo (IG) igual a 1,00.

Após os ensaios já mencionados, prosseguiu-se à realização dos ensaios de compactação do solo puro, e adotou-se os mesmos parâmetros obtidos para o SP na confecção das demais misturas 3DNB e 6DNB para moldagem dos corpos de prova do ensaio de ISC. Cabe destacar que a justificativa para a não realização do ensaio de compactação com as mistura se deve ao fato que de acordo com o fabricante do estabilizante o mesmo não influenciaria na compactação. Além disso, segundo Matias *et al* (2019), o uso do *Dynabase*© não apresenta mudanças consideráveis na caracterização física das misturas, apresentando apenas grandes alterações quando se trata do ensaio de ISC. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos para o peso específico aparente seco máximo e o teor de umidade ótima desses materiais.

Tabela 3. Resultados obtidos nos ensaios de compactação (Autores, 2023).

MATERIAL	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$ (kN/m³)	W_{ot} (%)
SP	18,86	12,9
SP + 3DNB		
SP + 6DNB		



Tayná Macêdo Rito de Santana,
Levy Pablo Silva Garcia, José Victor Rodrigues Pinto,
Franklin José Rodrigues Amorim, Joelson hora Costa,
Victor Manuel de Queiroz Lourenço & Camilla Maria Torres Pinto

Em relação ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), a Tabela 4 apresenta os valores obtidos, destaca-se que foram finalizados após quatro dias de imersão.

Tabela 4. Resultados obtidos no ensaio de ISC (Autores, 2023).

<i>MATERIAL</i>	<i>ISC (%)</i>	<i>EXPANSÃO (mm)</i>
SP	12,00	0,78
3DNB	61,00	0,04
6DNB	75,00	0,02

O ISC foi a propriedade geotécnica que apresentou melhor desempenho com a adição do estabilizante, tornando assim o material apto para utilização na camada de sub-base do pavimento, o que antes não seria viável, devido ao fato de apresentar 12% de ISC. Contudo, com a adição de apenas 3% do *Dynabase*®, o ISC apresentou aumento de cinco vezes quando comparado com o solo puro. A considerável diferença observada nos valores de ISC pode se dar devido ao fato de o solo ser heterogêneo e a camada dupla de argila, ocasionando uma maior interação entre o estabilizante e as partículas de solo. Além disso, constata-se a redução na expansão com a adição do estabilizante, o que reitera Batista (2019) e o fabricante do produto.

A Figura 5 apresenta um gráfico comparando os valores de ISC obtidos com este estudo, com valores encontrado na literatura. Contudo, apesar do *Dynabase*® ser um estabilizante que surgiu no mercado no ano de 1989, o número de artigos científicos encontrados foi considerado limitado, destacando assim a importância de mais pesquisas com esse material, com o intuito de ampliar o banco de dados existente.

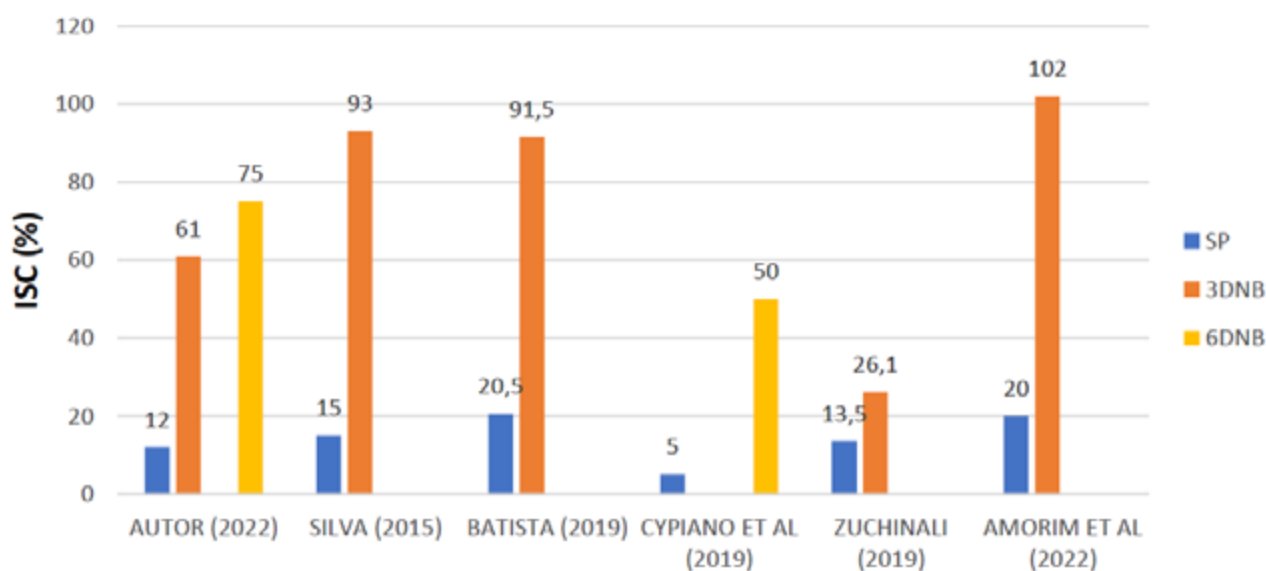


Figura 5. Resultados de ISC e de valores encontrados na literatura (Autores, 2023).

Ao todo foram encontrados cinco artigos citando o uso do *Dynabase*®, e para um melhor efeito de comparação, foi filtrado os resultados de acordo com a porcentagem de 3% e 6%, além do mesmo tipo de solo, ou seja, o solo A-4 que foi o mesmo utilizado na presente pesquisa.

A maioria das amostras apresentaram um ganho significativo no ISC com a utilização de apenas 3% do estabilizante. Cypriano *et al.* (2019) foi o único que não utilizou o teor de 3%, contudo, seus



DOI: [10.29327/1430212.49-36](https://doi.org/10.29327/1430212.49-36)

ANÁLISE DO ESTABILIZANTE DYNABASE® PARA REAPROVEITAMENTO DE SOLO LOCAL –
UM ESTUDO DE CASO APLICADO AO SISTEMA VIÁRIO DE UM SHOPPING CENTER NO MUNICÍPIO DE LAGARTO/SE

teores adotados foram 2% a 12%, com variação de 2%, portando o teor utilizado para comparação dos resultados com o presente trabalho foi o de 6%.

Após analisar os resultados das amostras e de acordo com as especificações do manual de pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT (2006) - para utilização em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários, respectivamente, além dos requisitos de baixa plasticidade, o material deve apresentar valores de ISC iguais ou superiores à 20% e 60%, com isso, houve adequabilidade das misturas com a adição do estabilizante para ambos os casos. Enquanto que apenas as amostras de solo em seu estado natural de Cypriano *et al.* (2019) e Amorim *et al.* (2022) estão adequadas para utilização em camada de sub-base. Sabe-se que a adição de 3%, elevou-se a categoria do solo para todas as amostras apresentadas no gráfico e as misturas sem adição de estabilizante dos demais autores, não se qualificam para aplicação em camadas de sub-base e base.

Todavia, Zuchinali (2019) não apresentou variação significativa na capacidade de suporte do solo, visto que a amostra tem maior quantidade de frações grossas presente em sua granulometria. E de acordo com Júnior (2016), as partículas mais finas absorvem os íons de cálcio do aditivo, modificando suas propriedades, com efeitos de cimentação e redução da quantidade de vazios presentes no solo.

As diferenças observadas entre os valores obtidos neste estudo e os demais autores podem estar relacionadas com a plasticidade de cada solo, como também ao tamanho das partículas. Contudo, apesar de pertencerem ao grupo A-4, existem faixas para se que enquadrem nesse grupo, com isso, a variação dentre essas porcentagens fazem com que ocorra mudanças em seus valores de ISC. Outro fator que também pode ser responsável por essas diferenças pode ser a faixa granulométrica do solo de cada pesquisa, como por exemplo Zuchinali (2019) apresentou 37,60% passando na peneira de malha #200, e seu solo obteve um resultado de NL e NP. Por fim, destaca-se que apesar das diferenças de origens, horizontes e classificações, é notório observar o ganho na capacidade de suporte do solo, ou seja, aumento do ISC.

Ademais, conforme os resultados apresentados, os materiais utilizados nesta pesquisa podem ser empregados em camadas de sub-base de pavimentos, onde as faixas granulométricas, limites de consistência, assim como, os parâmetros de expansão e ISC atenderam as exigências normatizadas pelo DNIT (2006). Vale ressaltar que para materiais utilizados nos pavimentos, o solo coletado poderá ser utilizado como sub-base de pavimentos, por apresentar Índice de Suporte Califórnia $\geq 20\%$, I.G. = 0 e expansão $\leq 1\%$, já para ser utilizado como base de pavimento de rodovia de baixo volume de tráfego é necessário possuir ISC $\geq 60\%$, expansão $\leq 0,5\%$, Limite de liquidez $\leq 25\%$ e Índice de plasticidade $\leq 6\%$, além de enquadrar em uma das quatro faixas granulométricas existentes.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou resultados de uma pesquisa com a tentativa de estabilização de um solo empregando o estabilizante *Dynabase*®, com o objetivo de analisar o comportamento geotécnico do solo puro e do solo com estabilizante, para posterior aplicação do material em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

A análise dos resultados dos ensaios realizados com as misturas contendo solo puro mais *Dynabase*® revelou a viabilidade do uso do estabilizante, conforme as principais conclusões elencadas a seguir.



Tayná Macêdo Rito de Santana,
Levy Pablo Silva Garcia, José Victor Rodrigues Pinto,
Franklin José Rodrigues Amorim, Joelson hora Costa,
Victor Manuel de Queiroz Lourenço & Camilla Maria Torres Pinto

O solo em estudo nesta pesquisa foi identificado e classificado como argila siltosa com baixa compressibilidade, apresentando 38% de fração de argila e silte, baixa plasticidade ($IP = 8\%$), baixíssima capacidade de suporte ($ISC=12\%$).

Os valores de ISC obtidos para as duas misturas testadas com o emprego do *Dynabase*® ficaram na faixa de 60% a 75%, respectivamente para os teores de 3% e 6% - valores considerados aceitáveis, de acordo com as especificações do DNIT (2006) para utilização da mistura em camadas de sub-base de pavimentos, contudo não aprovado para utilização em camadas de base.

Em comparação com os valores obtidos para o solo puro, conclui-se que uso do *Dynabase*® nas proporções utilizadas se mostrou eficiente para aumentar a capacidade de suporte do solo, em virtude dos elevados valores de ISC apresentados por esse solo. Portanto, o uso do *Dynabase*® como agente estabilizante pode se tornar promissor, contudo, devem ser realizadas pesquisas com maiores teores na mistura para se ampliar as análises e o banco de dados existente.

Pode-se notar que apesar da diferença entre as frações dos tipos de solo da atual pesquisa e dos demais autores, os resultados foram coerentes e similares, tornando o solo analisado apto para aplicação na camada de sub-base do sistema viário do *shopping center* do município de Lagarto/SE. Espera-se que esse artigo tenha seus resultados aplicados em estudos futuros e que incentive à pesquisa da influência de outros materiais de construção na engenharia civil, visando o reaproveitamento de materiais e redução do volume de bota-fora existentes nas obras.

Para possíveis trabalhos futuros, podem-se realizar ensaios adicionais para avaliar mais profundamente a ação do *Dynabase*® em um solo expansivo. Dentre eles, a difração de raios-X, análise térmica diferencial, análise térmica gravimétrica, além dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia e resistência à compressão simples. Ademais, uma análise da aplicação do *Dynabase*® em grande escala, por meio de um aterro experimental no local de estudo.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457**: Amostra de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9895**: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC): método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

AMORIM, F. J. R.; PINTO, J. V. R.; GARCIA, L. P. S.; LOURENÇO, V. M. Q. (2022). **Estudo e estabilização de solos da região metropolitana de Aracaju para uso em subcamadas de pavimentos de baixo volume de tráfego**. Iniciação Científica em Engenharia Civil, FACULDADE PIO DÉCIMO.

AZEVEDO, André Luis Cairo de. **Estabilização de Solos com Adição de Cal: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2010.



DOI: [10.29327/1430212.49-36](https://doi.org/10.29327/1430212.49-36)

ANÁLISE DO ESTABILIZANTE DYNABASE® PARA REAPROVEITAMENTO DE SOLO LOCAL –
UM ESTUDO DE CASO APLICADO AO SISTEMA VIÁRIO DE UM SHOPPING CENTER NO MUNICÍPIO DE LAGARTO/SE

- BATISTA, Mariane Sartor. **Análise para estabilização e melhoramento de solo com a utilização do aditivo Dynabase para uma estrada de terra localizada no município de Turvo/SC.** Santa Catarina: Unesc - Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2019. 15 p.
- BEHAK, Leonardo. **Estabilização de solo arenoso com cinza da casca de arroz e cal.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?.** Brasília: CNT, 2021.
- CORRÊA, J. F. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação.** 2008. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- CYPRIANO, Gustavo Leal; ARNS, Pedro (2019). **Estabilização de um solo argiloso com aditivo Dynabase para fins rodoviários.** Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil, UNESC.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, 2006. 274 p.
- DNIT 141/2010 – **ES: Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente - Especificação de serviço.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2010.
- DYNABASE. **Orientação Técnica De Serviço Para Execução De Camadas De Solo Estabilizado.** Penápolis: Dynabase Estabilizante de Solo, 2021.
- GONDIM, Lilian Medeiros. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará.** 2008. 248 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- GUIMARÃES, J. E. **A cal. Fundamentos e aplicações na Engenharia Civil.** 2. Edi. São Paulo: Pini, 2002.
- GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R. Life cycle sustainability analysis. **Journal of Industrial,** 2021.
- JÚNIOR, C. M. A. **Estudo da influência da utilização de estabilizante a base de hidróxido de cálcio aditivado em amostras de solo para fins de pavimentação.** 2016. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2016.
- MAHASNEH, Bassam Z. Use of aluminum residue and recycled asphalt pavement materials to stabilize silty clay soil, **Journal of Infrastructure Systems,** Virgínia, EUA, v. 22, n. 4, 2016.
- MATIAS, A. A. P.; ANGELO, R. M. de. **Uso de estabilizantes de solo para o aumento da durabilidade de estradas.** 2019. 20 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Fundação Hermínio Ometto (FHO), Araras – São Paulo, 2019.
- METCALF, J. B. **Soil stabilization – principles and practice.** Sydney: Butterworths, 1972.
- OLIVEIRA, a. G.; JESUS, a. C., & MIRANDA, S. B. **Estudo geológico – geotécnico dos solos expansivos da região do Recôncavo Baiano.** In: II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos - II Geojovem, Nova Friburgo/RJ, p. 1–6, 2010.
- ONU. Organização das Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** 2015. Disponível em:< <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em 10/09/2022.
- ONU. Organização das Nações Unidas. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** 2015. Disponível em:< <https://movimentoods.org.br/>> Acesso em 11/09/2022.
- SILVA, Luiz Alberto da. **Estudo Comparativo entre base estabilizada granulometricamente e Dynabase. Estudo de caso: Rodovia MGT/ 267 – Trecho Monsenhor Paulo/MG a Cordislândia/MG.** Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil. Varginha/MG: UNIS – Centro Universitário do Sul de Minas, 2015. 53p.



Tayná Macêdo Rito de Santana,
Levy Pablo Silva Garcia, José Victor Rodrigues Pinto,
Franklin José Rodrigues Amorim, Joelson hora Costa,
Victor Manuel de Queiroz Lourenço & Camilla Maria Torres Pinto

SILVA, Matheus Francisco da. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

VIANA, F. L. E. **Economia Circular e Gestão de resíduos Sólidos – Perspectivas para o Brasil e o Nordeste**. Fortaleza/CE. Estudos e Pesquisas do Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste – ETENE (ETENE/BNB). 2021. 17p.

ZUCHINALI, Júlia Crepaldi; ARNS, Pedro (2019). **Estabilização e melhoramento do solo de uma estrada de terra localizada no Município de Morro Grande - SC, com estabilizante Dynabase**. Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil, UNESC.



AVALIAÇÃO DO FOSFOGESSO DE UBERABA COMO ESTABILIZAÇÃO DE SOLO

Martins, Walter Contabile,¹; Araújo, Amanda Jakelline Dias.²; Dalto, Gustavo.³

RESUMO

Atualmente, a geração de resíduos vem sendo uma grande preocupação mundial, principalmente pelas empresas e indústrias. Um desses resíduos em questão é o fosfogesso. O fosfogesso, é um subproduto gerado pelas indústrias de fertilizantes fosfatados, no decorrer do processo para obtenção do ácido fosfórico (H_3PO_4). Essa geração é inevitável, e a indústria de fosfato é bem importante e rentável para o Brasil. Hoje o fosfogesso que antes era um subproduto, se encontra em formas de novos produtos, como: agricultura, construção civil, entre outras. O presente trabalho verifica a aplicabilidade do fosfogesso na pavimentação viária, analisando o seu comportamento e eficiência. O fosfogesso em estudo, está localizado na planta Mosaic Fertilizantes no município de Uberaba no estado de Minas Gerais. Para o teste em campo foi designada uma área de 300 metros dentro da planta da Mosaic Fertilizantes, trabalhando com 20 cm de profundidade. Foram utilizados 15% de fosfogesso (sem tratamento), entorno de 60 toneladas, sua mistura foi realizada com uma máquina escarificadora e arado, após umidade ótima a área foi nivelada e compactada. A mistura do fosfogesso e solo obteve excelentes resultados em campo, atingindo os objetivos de alternativa de estabilização de solo, onde visualmente performou como esperado, podendo ser uma alternativa de aplicação. Houve uma redução na manutenção periódica, sem redução do volume de tráfego, conseqüente diminuição de máquinas, emissão de CO_2 , consumo de diesel e redução de custos.

PALAVRAS-CHAVE: Fosfogesso; Pavimentação; Estabilização de Solo; Construção civil; Resíduo.

ABSTRACT

Currently, waste generation has been a major global concern, especially for companies and industries. One of these wastes in question is phosphogypsum. Phosphogypsum is a byproduct generated by the phosphate fertilizer industries, during the process to obtain phosphoric acid (H_3PO_4). This generation is inevitable, and the phosphate industry is very important and profitable for Brazil. Today, phosphogypsum, which was previously a by-product, is found in the form of new products, such as: agriculture, civil construction, among others. The present work verifies the applicability of phosphogypsum in road paving, analyzing its behavior and efficiency. The phosphogypsum under study is located at the Mosaic Fertilizandos plant in the municipality of Uberaba in the state of Minas Gerais. For the field test, an area of 300 meters was designated within the Mosaic Fertilizers plant, working at a depth of 20 cm. 15% of phosphogypsum (untreated), around 60 tons, was used, mixing was carried out with a scarifying machine and plow, after optimum humidity the area was leveled and compacted. The mixture of phosphogypsum and soil obtained excellent results in the field, achieving the objectives of an alternative soil stabilization, where it visually performed as expected, and could be an alternative application. There was a reduction in periodic maintenance, without a reduction in traffic volume, a consequent reduction in machines, CO_2 emissions, diesel consumption and cost reduction.

KEY WORDS: Phosphogypsum; Paving; Soil Stabilization; Construction; Waste;

¹ walter.martins@mosaicco.com - Empresa Mosaic Fertilizantes

² amandajds14@hotmail.com

³ gustavo.dalto@mosaicco.com - Empresa Mosaic Fertilizantes



INTRODUÇÃO

Atualmente, a geração de resíduos vem sendo uma grande preocupação mundial, principalmente pelas empresas e indústrias, há uma crescente no pensamento de geração mínima. Resíduos que antes eram descartados de qualquer forma, hoje há toda uma cadeia de descarte, tornando possível a geração de novos produtos. Tudo isso também devido a medidas regulatórias e rigorização da fiscalização ambiental no Brasil (ESTER et al., 2004).

Um desses resíduos em questão é o fosfogesso. O fosfogesso, é um subproduto gerado pelas indústrias de fertilizantes fosfatados, no decorrer do processo para obtenção do ácido fosfórico (H_3PO_4), a principal reação química que acontece no processo de formação do fosfogesso é o desgaste da rocha fosfática pelo ácido sulfúrico (H_2SO_4) (TOLEDO; PEREIRA, 2001).

Atualmente o fosfogesso produzido é armazenado em formato de pilha, no qual é feito monitoramentos para que não haja contaminação ambiental, seja pelo ar, solo e água (SANTOS et al., 2006). A composição química média do fosfogesso é semelhante a 17,7% de enxofre (S), 30,9% de óxido de cálcio (CaO), 0,2% de flúor (F) e 0,7% de fósforo (P_2O_5) (RAIJ, 1988).

Segundo Mangin (1978) o nível de impurezas presentes no fosfogesso, vai depender da rocha fosfática de origem, como é a produção e eficiência da planta, outro fator é seu Ph, quanto maior o tempo de estocagem menor será sua acidez. Mesquita (2007) em seu estudo na pilha de gesso de Catalão, encontrou um Ph de 3,7 demonstrando que sua análise foi realizada em uma amostra recente. O fosfogesso possui propriedades bem similares ao gesso natural, variando sua densidade entre 2,27 e 2,40 g/cm (SENES, 1987).

Essa geração é inevitável, e a indústria de fosfato é bem importante e rentável para o Brasil. E hoje o fosfogesso que antes era um subproduto, se encontra em formas de novos produtos, como: agricultura, indústrias de cimento, construção civil. Essas aplicações do fosfogesso contribui significativamente para o desenvolvimento sustentável, visando os três pilares da sustentabilidade: social, econômico e ambiental (OLAWUMI; CHAN, 2018).

O presente trabalho visa verificar a aplicabilidade do fosfogesso, sem tratamento (in natura) na pavimentação viária, como estabilização de solo, analisando o seu comportamento e eficiência. Atualmente, a empresa faz manutenções diárias devido ao tráfego interno de caminhões e por não ser um pavimento urbano tradicional. Em períodos de alto índice de chuvas essa manutenção possui a frequência aumentada e muitas vezes o tráfego é interrompido devido as questões de segurança. O teste foi realizado na planta da Mosaic Fertilizantes no município de Uberaba – MG, onde são necessários manutenções preventivas da via com a régua (máquina niveladora de terreno) diariamente, tendo como custos diários homem/hora e o consumo de combustível. A utilização do fosfogesso visa melhorar o perfil geotécnico, melhorando as condições do pavimento e consequentemente diminuir a manutenção.

Há trabalhos relacionando a utilização do fosfogesso na pavimentação, Mesquita (2007) e Metogo (2010) apresentaram resultados benéficos da utilização do fosfogesso. Metogo (2010), ressalta a importância de ter cuidados para controlar a expansão dessa mistura, limitando até 20%, já Mesquita (2007) recomenda que sejam utilizados teores de até no máximo 30%. Já o trabalho de Rufo



DOI: [10.29327/1430212.49-24](https://doi.org/10.29327/1430212.49-24)

AVALIAÇÃO DO FOSFOGESSO DE UBERABA COMO ESTABILIZAÇÃO DE SOLO

(2009), mostrou elevados valores de expansão, inviabilizando a mistura para tal finalidade, porém ele sugere a importância de medidas preventivas e de monitoramentos quando utilizados resíduos para pavimentação.

Um estudo feito por Silva e Rezende (2013) para avaliar as misturas com solo tropical, fosfogesso tratado termicamente (cimento e cal) para pavimentação. Elas mostraram que as misturas com fosfogesso tratado termicamente e cimento apresentaram resistência superior e menor expansibilidade em relação às misturas com di-hidratado. As autoras tiveram um retorno positivo do uso do fosfogesso como material de base e sub-base de pavimentos.

Já o trabalho da Alves (2015), a sua mistura de solo e fosfogesso TT mostrou elevadas resistências, mesmo após ser submetida à saturação, sugerindo que o cimento seja desnecessário na composição.

MATERIAIS E MÉTODOS

O fosfogesso em estudo, está localizado na planta Mosaic Fertilizantes localizado no município de Uberaba no estado de Minas Gerais. Também conhecido como gesso químico, é um resíduo industrial proveniente das rochas fosfáticas, principal componente de fertilizantes fosfatados (Figura 1). A principal reação química que acontece no processo de formação do fosfogesso é o ataque da rocha fosfática pelo ácido sulfúrico (H_2SO_4) (TOLEDO; PEREIRA, 2001). Abaixo uma foto do fosfogesso, no qual é depositado em pilha (figura 1).



Figura 1: Pilha de fosfogesso de Uberaba/MG (MOSAIC, 2023)

Para o teste em campo (Figura 2) foi designada uma área de 300 metros, com 7 metros de largura, dentro da planta da Mosaic Fertilizantes em Uberaba, trabalhando com 20 cm de profundidade. O tráfego na área é industrial, composto por caminhões basculantes de 6 eixos com capacidade mínima de 20 toneladas. Os caminhões fazem o trecho carregado, transportando material em deslocamento. Foram instalados poços de monitoramento três meses antes do teste, esses poços servem para melhor acompanhamento e melhor possibilidade de análises de contaminação. Realizamos os ensaios conforme NBR 10004:2004, em laboratório externo e acreditado, de lixiviado



e solubilizado. Uma semana antes do teste foram retiradas amostras para análise, outra análise posterior a 90 dias e uma análise após 12 meses, um ano de teste.



Figura 2: Área de teste (MOSAIC, 2023)

Na primeira amostragem, meses antes do teste, todos os parâmetros analisados apresentaram resultados dentro dos padrões preconizados pela NBR 10004:2004 para lixiviados. Os parâmetros Alumínio Total, Ferro Total, Fluoreto Total, Manganês Total e Sulfato Total, apresentaram resultados fora dos padrões permitidos pela NBR 10004:2004 para solubilizados, podendo ser fatores potenciais impactados.

Em laboratório foi analisado o solo da área de testes e foi definida a melhor composição e proporção de adição de fosfogesso para atingir o desempenho esperado. Os resultados laboratoriais mostraram que o solo da área de testes é um tipo de solo argiloso. Com a adição 15% de fosfogesso foi possível encontrar um aumento de 10% de CBR. Além disso, os ensaios mostraram que o Fosfogesso não precisa de acerto de pH com cal para ser utilizado para estabilização de solos. A tabela (Tabela 1) apresenta as especificações para enquadramento do pavimento como base e sub-base pelo DNIT, e o resultado do presente trabalho

CAMADA	CBR (%)	EXPANSÃO (%)
SUB-BASE	≥ 20	$\leq 0,5$
BASE	≥ 60	$\leq 0,5$
Trabalho	57	0,04

Tabela 1. Especificação DNIT vs trabalho (DNIT, 2006)

A avaliação da capacidade de absorver tráfego foi realizada conforme os seguintes testes e métodos normativos (tabela 2):



DOI: 10.29327/1430212.49-24

AVALIAÇÃO DO FOSFOGESSO DE UBERABA COMO ESTABILIZAÇÃO DE SOLO

TESTE	TRÁFEGO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE	MÉTODO
ISC (CBR)	alta	> 70	%	DNER-ME 172/16
	média	40 to 70		
	baixa	< 40		
	Trabalho	57		
EXPANSÃO	alta	> 3	%	DNER-ME 172/16
	média	0,5 to 3		
	baixa	< 0,5		
	Trabalho	0,04		
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	alta	> 30	%	DNER-ME 122/94
	média	7 to 30		
	baixa	< 7		
	Trabalho	7,6		

Tabela 2. Especificação de tráfego vs método vs resultado obtido

O teste foi realizado na terceira semana de abril, entre os dias 17 e 22 de abril. No dia 17, toda a equipe participante do projeto se reuniu para alinhamento de detalhes, como a chegada do fosfogesso e maquinário necessário. No dia 18, após a abertura do solo (20 cm) foi adicionado a proporção de gesso (15%), sua mistura foi realizada com Escarificadora e Arado. Essa mistura é realizada até obter uma homogeneidade do material. Na Figura 3, podemos observar a mistura do solo com o fosfogesso, no qual foi utilizada a proporção de 60 toneladas do resíduo.

O solo argiloso predominante na região, possui uma grande facilidade de acúmulo de água e apesar do fosfogesso ter auxiliado nessa questão, foi necessário passar a escarificadora e a grade para auxiliar o solo na exposição ao sol, para alcançar a umidade ótima desejada. Foi determinado no laboratório que a umidade ótima do solo com o fosfogesso é de 15% a 19% de umidade, e dessa forma foi aplicado em campo. Primeiramente foi coletado amostras de solo ao longo do trecho de 300 metros, esse material foi passado na peneira para reduzir o tamanho dos grânulos, e depois foi utilizado um higrômetro para medir a umidade do solo.

Após a umidade ótima do material que estava em 19%, passou-se a régua niveladora em toda a área, e após sua nivelção, foi utilizado o rolo compactador, para compactar o terreno. No final da compactação, a área já se encontrava pronta para a passagem normal do tráfego.



Figura 3: Etapas do processo de pavimentação (MOSAIC, 2023)

Após a entrega da área e a inauguração no dia 24 de abril, no mesmo dia passaram um total de 70 caminhões. No dia 25 de abril, um dia após a inauguração da área, passaram um total de 151 caminhões ao longo do dia. E todo esse tráfego seguiu sem a necessidade de passar a régua niveladora para acertar a área. A empresa que presta serviço dentro da Mosaic Fertilizantes de manutenção das vias, informou que geralmente passa a régua niveladora nas áreas todos os dias, geralmente para acertar o solo que vai acumulando em um determinado local (denominado como costelas de vaca). A passagem deste equipamento não configura como manutenção da via, apenas quando é necessário fazer toda a parte de compactação. Dentro da planta, gasta-se entorno de 40 minutos para passagem na régua niveladora, e para uma nova manutenção com compactação entorno de 7 dias, devido a utilização de mais maquinários.



DOI: [10.29327/1430212.49-24](https://doi.org/10.29327/1430212.49-24)

AVALIAÇÃO DO FOSFOGESSO DE UBERABA COMO ESTABILIZAÇÃO DE SOLO



Figura 4: Motoniveladora, ou Régua Niveladora. Fonte: <https://www.lafaetelocacao.com.br/produto/motoniveladora/>

Hoje a empresa que presta serviço dentro da Mosaic, tem o valor hora do operador de R\$ 17,00 e o maquinário com o gasto de combustível (diesel) de 13 Km/l. Com a utilização do fosfogesso, a ideia é reduzir a necessidade de manutenção dentro do complexo da Mosaic Fertilizantes, além disso, a empresa não fica inoperante em momentos de chuva.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a entrega da área tratada com fosfogesso, foi passada a régua niveladora apenas uma vez no local do teste, o que já se configura como um excelente resultado. O fosfogesso possui muito potencial de uso como material de construção de bases ou sub-bases de pavimentos. Entretanto ele apresenta pouca resistência à compressão simples e pouca durabilidade quando é submetido a estabilidade mecânica devido à compactação (GUTTI et al., 1996). Entretanto ele vem tendo excelentes resultados na área do teste, suportando uma grande incidência de veículos leves e principalmente pesados, sem a necessidade de manutenção.

A aplicação do fosfogesso em base e sub-base em pavimentações é realidade em países como os Estados Unidos. Um monitoramento realizado por durante cinco anos indicaram resultados esplendidos na cidade de La Porte no estado do Texas, o local sofre de grande incidência de tráfego e ainda apresenta uma excelente capacidade de suporte, o local utilizou misturas de fosfogesso e cimento nas proporções de 90% e 10%, respectivamente (CHANG et al., 1989).

Portanto, o fosfogesso surge como uma alternativa promissora viável para a pavimentação, possibilitando uma destinação ambientalmente adequada para esse resíduo e podendo reduzir assim a necessidade de exploração de recursos naturais para base e sub-base. Abaixo segue a proporção de caminhões passantes (Tabela 3) na pista antes e durante o teste, nos anos de 2023 e 2024.



<i>Resumo de Caminhões 2023/24*</i>	<i>Quantidade</i>
<i>Janeiro</i>	4506
<i>Fevereiro</i>	5256
<i>Março</i>	5658
<i>Abril</i>	5052
<i>Mai</i>	6114
<i>Junho</i>	6498
<i>Julho</i>	6148
<i>Agosto</i>	5514
<i>Setembro</i>	7298
<i>Outubro</i>	3814
<i>Novembro</i>	7036
<i>Dezembro</i>	7048
<i>Janeiro*</i>	5525
<i>Fevereiro*</i>	4956
<i>Março*</i>	4352
<i>Total</i>	84775

Tabela 3. Meses vs caminhões passantes na zona de teste

Abaixo, os registros fotográficos da avaliação da área pavimentada com fosfogesso ao longo do ano de 2023. OBS: primeira foto são sempre da área pavimentada com fosfogesso (esquerda) em comparação com a pista testemunha (direita) sem fosfogesso. Algumas datas possuem terceira foto, que são alterações na pista em relação ao acúmulo de chuvas.



Figura 5: Imagem de 6 de junho - 2023 (MOSAIC, 2023)

Até setembro, foram meses de estiagem. No início de outubro houve chuvas isoladas no qual tivemos o primeiro indicativo. Como pode observar abaixo, no dia 05 de outubro, a estrada onde não houve o tratamento com fosfogesso teve uma reação diferente da área com tratamento.



[DOI: 10.29327/1430212.49-24](https://doi.org/10.29327/1430212.49-24)

AVALIAÇÃO DO FOSFOGESSO DE UBERABA COMO ESTABILIZAÇÃO DE SOLO



Figura 6: Imagem de 5 de outubro - 2023 (MOSAIC, 2023)

Em 27 de novembro, houve bastante chuva na região, e observou-se que a pista sem o tratamento acabou retendo bastante água, não sendo possível trafegar.



Figura 7: Imagem de 27 de novembro - 2023 (MOSAIC, 2023)

Houve continuidade de chuvas na cidade de Uberaba entre os meses de novembro a janeiro, aumentando a quantidade de água retida no solo na pista sem fosfogesso, inclusive aumentando mais uma parte com possibilidade de atolamento e sequente interdição de operação. As fotos a seguir demonstram o comportamento do ano de 2024:



WALTER CONTABILE MARTINS,
AMANDA JAKELLINE DIAS ARAÚJO,
GUSTAVO DALTO



Figura 8: Imagem de 15 de fevereiro - 2024 (MOSAIC, 2023)



Figura 9: Imagem de 7 de março - 2024 (MOSAIC, 2023)

As amostras iniciais de gesso e solo indicaram a possibilidade de contribuição dos parâmetros de Alumínio Dissolvido (Al), Arsênio Dissolvido (As), Fluoreto e Sulfato. Instalou-se 2 poços a jusante do teste para monitoramento. Ao comparar a análise inicial com as análises de 90 dias e 360 dias, é possível considerar que as análises dos poços de monitoramento não evidenciaram aumento significativo dos parâmetros.



DOI: [10.29327/1430212.49-24](https://doi.org/10.29327/1430212.49-24)

AVALIAÇÃO DO FOSFOGESSO DE UBERABA COMO ESTABILIZAÇÃO DE SOLO

CONCLUSÃO

Para este teste em questão, com o determinado tipo de solo (argiloso), a estabilização de solo feita com 15% de adição de fosfogesso (in natura) em sua composição foi promissora. Totalizou-se 84775 caminhões (carregados com aproximadamente 20 toneladas cada) em 10 dias de testes, aproximadamente 15.800 toneladas sobre a zona de teste. Utilizou-se então, aproximadamente o consumo de 20 toneladas de material a cada 100 m de via, portanto um consumo de 200 kg/m de fosfogesso in natura.

Houve apenas uma manutenção preventiva com a régua (máquina niveladora de terreno) evitou-se um total de R\$170,00 (1h/dia) no trecho por 10 dias. Como não houve passagem de maquinário corretivo, um custo evitado no trecho de 300 metros de cerca de 0,02 Litros de Diesel por equipamento totalizando 15,8 L de diesel não utilizados.

Estes resultados são promissores como alternativas em estradas vicinais, não pavimentadas. A utilização do fosfogesso como estabilização de solo precisa ser mais aprofundada, todavia neste teste, prolongou a vida útil do sistema em 1 ano de teste, reduzindo manutenção e sendo uma alternativa “barata” as atuais, com alguns custos evitados significativos. O teste também possibilitou vislumbrar mais uma aplicação para o fosfogesso que é uma alternativa para o passivo ambiental. As análises dos poços de monitoramento, na área escolhida, não evidenciaram colaboração da contaminação do solo pelo material.

REFERÊNCIAS

- ALVES, K. C. S. K. **Estudo do fosfogesso tratado termicamente e de suas misturas com solo tropical**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- PARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 2006. 274p
- ESTER et al. Cultural change and environmentalism: a cross-national approach of mass publics and decision makers. **Revista Ambiente e Sociedade**, São Paulo, vol. 7, n. 2, 2004.
- MANGIN, S. Généralités. **Le phosphogypse**: utilisation d'un sous-produit industriels em technique routière. Laboratoire Central de Ponts e Chaussées, Numéro spécial VII, 1978, p.p. 7-15.
- MESQUITA, G.M. **Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação**. 2007. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2007.
- METOGO, D. A. N. **Construção e avaliação inicial de um trecho de pavimento asfáltico executado com misturas de solo tropical, fosfogesso e cal**. 2010. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2010.
- OLAWUMI, T., & CHAN, D. (2018). A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, 183(2018), pp.231-250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.1620959-6526>.
- RAIJ, B.V. **Gesso Agrícola na Melhoria do Ambiente Radicular no Subsolo**. ANDA- Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas. São Paulo, 1988. 88 p.
- RUFO, R. C., **Estudo Laboratorial De Misturas De Fosfogesso, Solo Tropical E Cal Para Fins De Pavimentação**, Goiânia, GO: UFG, 2009. 155 p.



SANTOS, A.J.G.; SILVA, P.S.C; MAZZILI, B. P; FAVARO, D.I. Radiological Characterization of disposed phosphogypsum in Brazil: Evaluation of the occupation exposure and environmental impact. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 121, p. 179-185, 2006.

SENES, Consultantes Limited. **An analysis of tohe major environmental and health concerns of phosphogypsum tailings in Canada and methods for their reduction.** Ontario. Min, Environ, and Environ. Canadá, 1987.

SILVA, M. V.; REZENDE, L. R. **Estudos laboratoriais de misturas com solo tropical, fosfogesso anidro, cimento e cal para pavimentação.** Relatório de Iniciação Científica. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2013.

TOLEDO, M. C. M.; PEREIRA, V. P. A variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. **Revista do Instituto Geológico.** São Paulo. p.p. 27-64. 2001.



ESTUDO DA VARIAÇÃO DO PH AO LONGO DO TEMPO EM DOIS SOLOS DO DISTRITO FEDERAL MELHORADOS COM CAL

Paulo Costa Fernandes¹; Gisandra Faria de Paula²; Dan Imbroisi Brant Teixeira³; Rafael Cerqueira Silva⁴.

RESUMO

A formação mineralógica de latossolos, geralmente ácidos, são propícios para reagirem quimicamente com materiais básicos, como a cal, gerando novos minerais que melhoram as suas propriedades mecânicas e podem compor as subcamadas dos pavimentos flexíveis. Neste estudo, foi observada, em laboratório, a variação do potencial hidrogeniônico (pH) ao longo do tempo (1 a 200/243 dias), em H₂O e em KCl, de duas amostras de latossolos de regiões distintas do Distrito Federal, com 3% (S-2) e 5% (S-1) de cal adicionada. Verificou-se em ambas as amostras que a transição do pH passando pelo ponto de carga zero (PCZ) ocorreu em datas semelhantes (60 dias). O S-2, a partir do 60º dia, passou a ser um solo com capacidade de troca catiônica, enquanto o S-1 passou a ter a capacidade de troca aniônica. Verificou-se também uma tendência de diminuição no valor de pH com o passar do tempo para ambas as amostras, indicando uma provável reação química com os minerais no interior das agregações. Tal redução pode estar associada a reações químicas de cimentação causada pelos silicatos de cálcio hidratado ou aluminato de cálcio hidratado. Por fim, pela simplicidade, baixo custo e rapidez, sugere-se a adoção do ensaio de pH no controle de execução de obras em que o solo seja melhorado ou estabilizado com cal.

PALAVRAS-CHAVE: pH, PCZ, cal, latossolo, estabilização química.

ABSTRACT

The mineralogical formation of latosols, which are generally acidic, is conducive to them reacting chemically with basic materials such as lime, generating new minerals that improve their mechanical properties and can make up the sub-layers of flexible sidewalks. In this study, the variation in hydrogenionic potential (pH) over time (1 to 200/243 days) in H₂O and KCl of two samples of latosols from different regions of the Federal District, with 3% (S-2) and 5% (S-1) added lime, was observed in the laboratory. Both samples showed that the pH transition through the zero charge point (ZCP) occurred at similar times (60 days). From the 60th day onwards, S-2 became a soil with cation exchange capacity, while S-1 became one with anion exchange capacity. There was also a tendency for the pH value to decrease over time for both samples, indicating a probable chemical reaction with the minerals inside the aggregates. This reduction may be associated with chemical cementation reactions caused by hydrated calcium silicates or hydrated calcium aluminate. Finally, due to its simplicity, low cost and speed, it is suggested that the pH test be used to control the execution of works in which the soil is improved or stabilized with lime.

KEY WORDS: pH, PCZ, lime, latosol, chemical stabilization.

^{1, 2, 3} Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF): SAM Bloco C, Setor Complementares, Ed. Sede do DER/DF, CEP 70.620-030, Brasília, DF, Brasil, paulo.fernandes@der.df.gov.br; gisandra.paula@der.df.gov.br; dan.teixeira@der.df.gov.br.

⁴ Univers. de Brasília (UnB): Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil, rafael.silva@unb.br.



INTRODUÇÃO

A busca por melhorias na pavimentação brasileira vem sendo objeto de várias pesquisas em universidades e no meio técnico rodoviário, objetivando, entre suas diversas necessidades, oferecer uma estrutura de pavimento com maior valor agregado do comportamento dos materiais que compõem suas camadas frente às ações de tráfego, clima e disponibilidade ambiental.

Na tentativa de viabilizar uma obra de pavimentação, são utilizados materiais locais que, por vezes, apresentam propriedades e comportamentos que não cumprem os requisitos necessários à execução da estrutura de pavimento. Nestes casos, recorre-se, geralmente, à estabilização química e/ou granulométrica dos solos, por ainda ser esta uma alternativa atrativa, pois permite a utilização dos solos da própria região do empreendimento, diminuindo os custos em relação à distância de transporte, fator que onera o custo de uma obra.

Uma solução técnica que vem sendo constantemente adotada nos projetos e construções de estruturas de pavimentos não só do Distrito Federal, mas do Brasil, em particular em regiões com escassez de materiais pétreos, é o melhoramento ou estabilização química com cal e/ou cimento do solo local, geralmente, solos lateríticos finos. Entre os anos de 2018 e 2023, 83% das obras de pavimentação licitadas pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF) apresentaram como solução técnica a melhoria ou estabilização química da base e/ou sub-base (DER-DF, 2021).

Segundo Herrin e Mitchell (1961), os solos estabilizados com cal têm sua plasticidade reduzida, aumentam a resistência à compressão não confinada e majoram o Índice de Suporte Califórnia (ISC). No entanto, tais mudanças de comportamento dependem da mineralogia do solo, como apontam os resultados apresentados por Grim (1962).

Os resultados obtidos com a interação solo-cal dependem dos argilominerais constituintes do solo e de fatores como o potencial hidrogeniônico (pH) do solo, teor de matéria orgânica, grau de intemperismo, sulfatos solúveis e concentrações alumina-sílica (LITTLE, 1995), sendo o tempo de cura também considerado um fator preponderante na resposta solo-cal, pois tempos de cura maiores auxiliam no ganho de resistência do solo ao promoverem a ampliação das ligações entre as partículas solo-cal (ROCHA; REZENDE, 2016).

Assim, no presente artigo apresenta-se a análise de dois solos (latossolos) de regiões distintas do Distrito Federal (DF), considerando a variação do pH ao longo do tempo, em ambientes laboratoriais com umidade e temperatura controladas, de modo que as reações químicas entre o solo e a cal aconteçam em condições de contorno bem delimitadas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil, predominam dois tipos de cales, de acordo com a sua formação química: cal dolomítica, que apresenta óxido ou hidróxido de magnésio e cal calcítica, que apresenta óxido ou hidróxido de cálcio. A cal calcítica é comercializada virgem – CaO (óxido de cálcio) ou hidratada – Ca(OH)₂ (hidróxido de cálcio) (SILVA, 2016). Segundo Herrin e Mitchell (1961), o óxido de cálcio provém de rochas carbonatadas e o processo de hidratação da cal é exotérmico. Silva (2016) apresenta, na Tabela 1, os tipos de cales facilmente obtidas no mercado nacional.

Com o objetivo de definir parâmetros de qualidade, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) publicou, normativa técnica (DNIT 419/2019 – ME) que especifica os parâmetros mínimos de exigência química e física para as cales calcíticas adotadas em obras rodoviárias e ferroviárias (solo-cal), visando a determinação do teor mínimo de cal calcítica para estabilizar o solo com fundamento no critério da medição de pH, objetivando atingir o pH de 12,4,



DOI: 10.29327/1430212.49-26

ESTUDO DA VARIAÇÃO DO PH AO LONGO DO TEMPO
EM DOIS SOLOS DO DISTRITO FEDERAL MELHORADOS COM CAL

ponto em que ocorre a saturação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e, assim, promover a realização dos ensaios mecânicos.

Tabela 1. Tipos de cales comercializadas no Brasil (Silva, 2016).

Composição química	Nomenclatura
CaO	Cal calcária virgem
CaO.MgO	Cal dolomítica virgem
Ca(OH) ₂	Cal calcária hidratada
Ca(OH) ₂ .MgO	Cal dolomítica mono hidratada
Ca(OH) ₂ .Mg(OH) ₂	Cal dolomítica bi hidratada

O pH permite identificar o grau de atividade de um ácido ou de uma base em termos da atividade iônica do seu hidrogênio. Seu valor é diretamente associado pela relação das concentrações de íons de hidrogênio [H^+] e de íons de hidroxila [OH^-]. E, no solo, relaciona-se com a medida de acidez do solo (concentração de íons H^+) que, em função dos valores encontrados nas soluções, poderá ser classificado como ácido ($\text{pH} < 5,5$ – concentração de íons de H^+ é maior do que a concentração de íons OH^-), moderadamente ácido (pH entre 5,5 e 6,4), praticamente neutro (pH entre 6,5 e 6,9), neutro ($\text{pH} = 7$) e alcalino ($\text{pH} > 7$) (BIGARELLA *et al.*, 1996 citado por LIMA, 2003).

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2023), os solos brasileiros têm o seu pH entre 3,5 e 5,5, o que os caracterizam como levemente ácidos e constitui-se um parâmetro de fácil obtenção de resultados para caracterização do solo.

Em 1997 (atualizado em 2017), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) desenvolveu um método para a leitura do pH em suspensão, em meio aquoso, no qual adotava a proporção solo: água em 1:2,5. Em 2017, esta empresa suplementou a metodologia substituindo o H_2O por $\text{KCl } 1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (cloreto de potássio), mantendo-se a proporção descrita anteriormente.

Com esta nova metodologia, é possível determinar o valor do ponto de carga zero (PCZ), caracterizado pelo resultado onde os íons determinantes de potencial (H^+ e OH^-) são iguais e, conseqüentemente, a dispersão em meio aquoso é interrompida. Na Figura 1, Prado (2022) apresenta um solo em que o PCZ é identificado no pH 5,6.

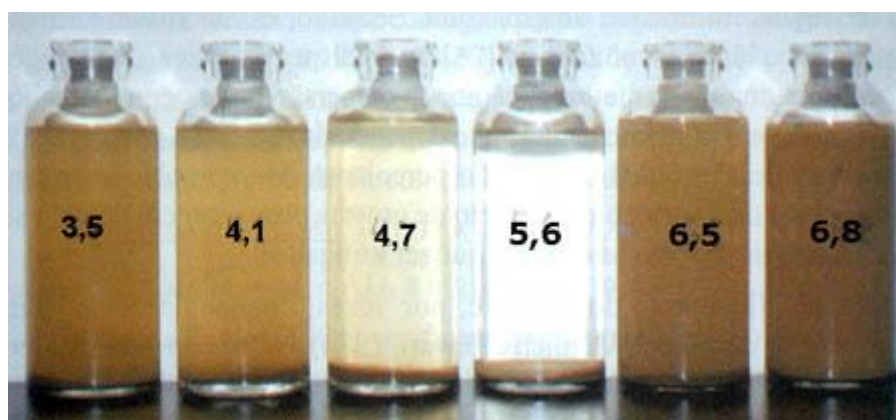


Figura 1. PCZ identificado no pH 5,6 (PRADO, 2022).



Paulo Costa Fernandes,
Gisandra Faria de Paula,
Dan Imbroisi Brant Teixeira,
Rafael Cerqueira Silva

Prado (2022) também afirma que solos com pH em água menor que o PCZ são solos com capacidade de troca de ânions (CTA) e aqueles com pH em água maior que o PCZ apresentam capacidade de troca de cátions (CTC).

Keng e Uehara (1974) determinaram uma formulação para a obtenção do PCZ, conforme Equação 1.

$$PCZ = 2 * pH_{KCl} - pH_{H_2O} \quad (1)$$

PCZ com valor positivo indica que a amostra tem predominância de óxidos-hidróxidos de ferro e alumínio e, para valores negativos, a grande presença de argilas silicatas (CARDOSO, 2002).

Quando o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ entra em contato com a argila, os íons Ca^{+2} e OH^- são facilmente dissociados na presença de água (CASTRO, 1995).

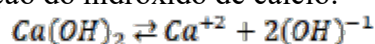
Volk e Jackson (1963, *apud* CASTRO, 1995) definiram em 5 faixas de pH as principais reações químicas:

- $pH < 4,0$: neutralização de hidrogênio trocável, via troca catiônica;
- $4,0 < pH < 5,6$: neutralização de H^+ e Al^{+3} pH- dependentes e hidrólise dos íons Fe^{+2} Fe^{+3} e Al^{+3} , via troca catiônica;
- $5,6 < pH < 7,6$: formação de hidroxí-polímeros de alumina e neutralização de grupamentos terminais aluminol, $Al(OH)_n$;
- $7,6 < pH < 11$: neutralização de grupos fracos - $Al(OH)$ e reação com grupamentos silanol, $SiOH$;
- $pH > 11$: início das reações pozolânicas, liberação de sílica e alumina com formação de compostos cimentantes.

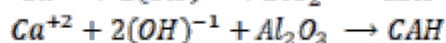
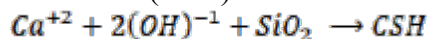
Prado (2016, atualizado em 2022) informa que o cálcio e o alumínio são cátions floculantes (aglutinadores) e que o sódio é um cátion dispersante.

Com base nesta informação, o DNIT, em 2019, apresentou normatização (DNIT 419/2019 – ME) para determinar o teor mínimo de cal em solos melhorados/estabilizados quimicamente, por meio da elaboração da curva do pH x teor de cal em porcentagem, apresentando também as equações da reação da cal com os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio presentes no solo, conforme sequência a seguir:

- 1) Em $pH \geq 12,4$ – Solubilização do hidróxido de cálcio:



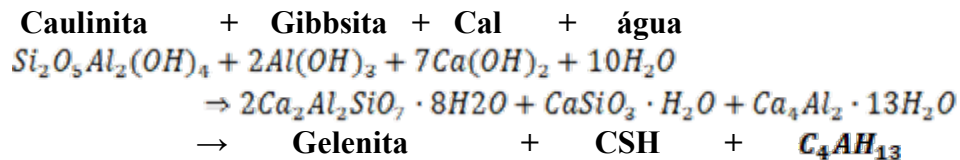
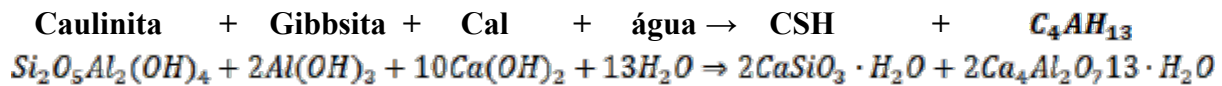
- 2) Os íons de cálcio e de hidróxido passam a reagir com os óxidos de silício e alumínio gerando silicatos de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratado (CAH).



Adiante, apresentem-se alguns exemplos das reações químicas que ocorrem quando cal é progressivamente adicionada a um solo até o $pH=12,4$. Toda a cal adicionada à suspensão de um solo, primeiramente, é utilizada nas reações de troca catiônica e de neutralização e depois se iniciam as reações químicas com a argila, que resultam na formação de compostos cimentantes que oferecem maior resistência mecânica à subcamada do pavimento (DNIT 419/2019):



DOI: 10.29327/1430212.49-26

ESTUDO DA VARIAÇÃO DO PH AO LONGO DO TEMPO
EM DOIS SOLOS DO DISTRITO FEDERAL MELHORADOS COM CAL

DADOS DO ESTUDO

Solos Estudados

Para o presente estudo, foram selecionados latossolos em duas regiões distintas do Distrito Federal. O primeiro (S-1) provém do estudo realizado por Teixeira *et al.* (2019), o qual está localizado próximo à Estrada Parque Taguatinga (EPTG), rodovia distrital DF-085, na região de Águas Claras (coordenadas 15°49'47,9"S / 48°02'51,5"W). O segundo solo (S-2) foi coletado, a 3,0 m de profundidade, no Parque Rodoviário do DER-DF, próximo ao Km 0, da BR-020 (coordenadas 15°41'08.2"S 47°50'46.2"W), conforme Figura 2. A distância entre os dois solos é de, aproximadamente, 31 km e, ambos, configuram caixas de empréstimos de solos para utilização em obras rodoviárias do DER-DF.

Ensaio da Variação do pH em H₂O e em KCl com o Tempo

Para o solo S-2, após sua coleta em campo, o mesmo foi acondicionado em saco plástico, com resistência suficiente para não rasgar ao ser manuseado e conservado pois foi a mesma metodologia adotada por Teixeira *et al.* (2019).

Esta amostra teve a umidade de campo preservada, sendo adotado dois sacos plásticos para o acondicionamento e a armazenagem ocorreu em local sem a incidência de luz solar e com temperatura ambiente amena.

Antes da realização da determinação do pH realizou-se a determinação da umidade ótima e da densidade real dos grãos para a compactação em campo. Após isto foi realizada determinação do pH do solo natural tanto em H₂O quanto em KCl. Para a adição de cal adotou-se 3% de cal hidratada calcítica tipo CH-III em massa para o solo S-2. Para o solo S-1, a quantidade de cal utilizada foi de 5% em massa, conforme estudo de Teixeira *et al.* (2019). A escolha do valor da adição de cal para S-2 baseou-se em diretrizes de projetos de pavimento flexível do DER-DF, em que o uso deste solo integrou tal projeto (ciclovias), realizado em 2018.

Para as leituras do pH em H₂O e em KCl nos intervalos de tempo de dias: 0 (1h após a mistura), 1, 3, 8, 14, 24, 56, 90, 123 e 200, foi utilizado o equipamento Lucadema 210-P, um pHmetro portátil, com mala para transporte, autonomia de operação de 8h de funcionamento e com baterias recarregáveis, o que confere simplicidade, baixo custo e rapidez na realização do ensaio, conforme Figura 3.

Os resultados do Solo S-1 foram são oriundos do estudo de Teixeira *et al.* (2019) com metodologia de preparo e armazenamento similar, mas com leituras a 3, 164 e 245 dias tanto para o pH em H₂O quanto o pH em KCl.



Paulo Costa Fernandes,
Gisandra Faria de Paula,
Dan Imbroisi Brant Teixeira,
Rafael Cerqueira Silva

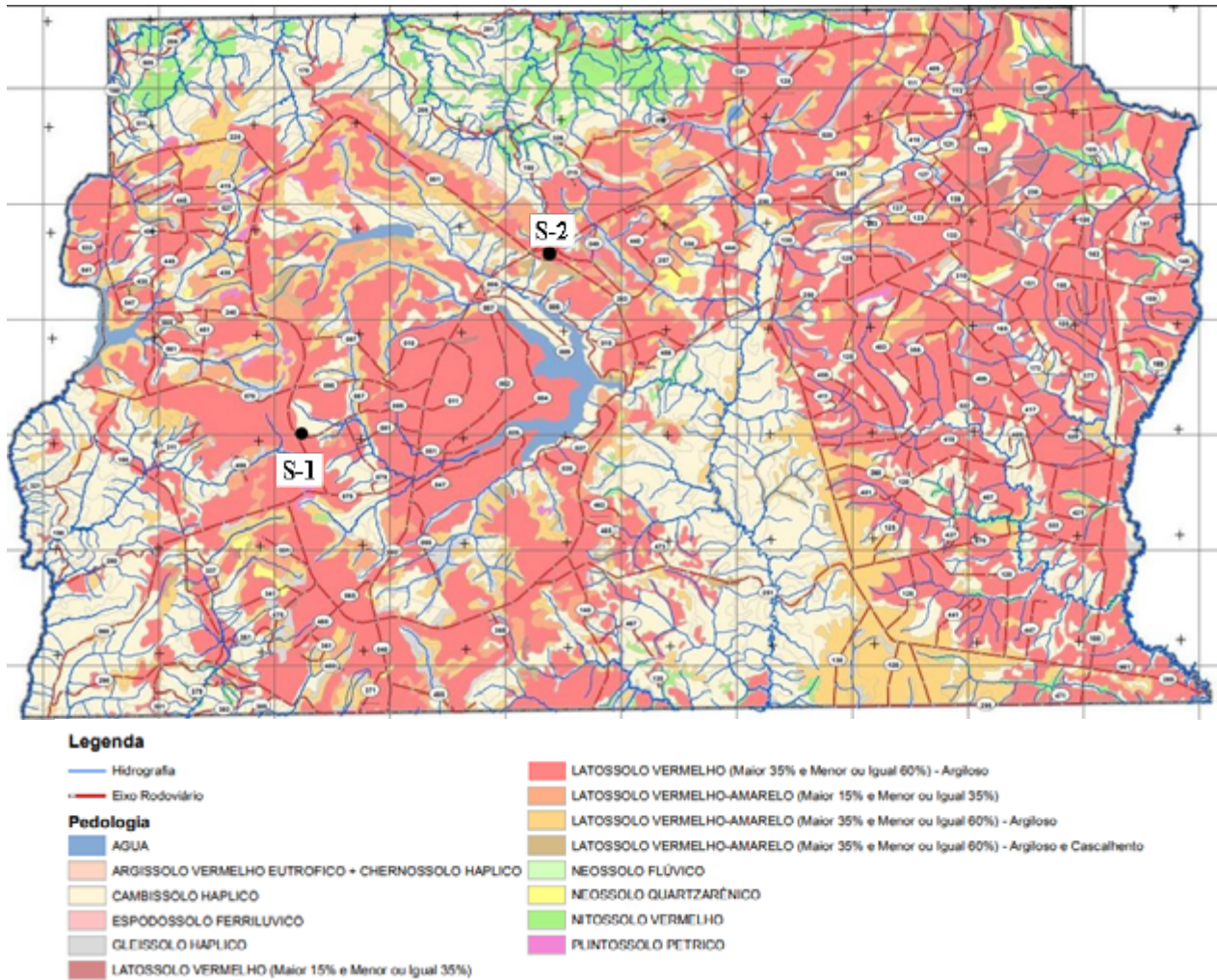


Figura 2. Localização dos solos S-1 e S-2 no mapa pedológico do DF (DER-DF, 2015).



Figura 3. Medidor de pH portátil do DER-DF.



DOI: 10.29327/1430212.49-26

ESTUDO DA VARIAÇÃO DO PH AO LONGO DO TEMPO
EM DOIS SOLOS DO DISTRITO FEDERAL MELHORADOS COM CAL

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2023), as partículas geralmente tendem a flocular em meio mais ácido ou próximo do PCZ, e a se desagregarem em meio mais alcalino do que o PCZ. Para os solos tropicais com pH inferior àquele correspondente ao PCZ, as partículas caminham para uma desagregação quando o pH aumenta passando pelo correspondente ao de carga zero, a qual se configura como uma considerável característica quando se realiza a estabilização química do solo. A partir do cálculo do PCZ, conforme Equação 1, foram encontrados os valores descritos na Tabela 2, que indicam ser o PCZ tanto do solo *in natura* quanto do solo-cal próximos dos valores do pH do solo, situação em que não chegou a provocar a desagregação do solo com a adição da cal, pelo contrário, a cal promoveu a agregação do solo.

Tabela 2. PCZ do solo *in natura* e após a adição de cal (zero dias).

Solo <i>in natura</i>	G _s (g/cm ³)	w _{ot} (%)	pH H ₂ O	pH KCl	PCZ
S-1	2,724	27,7	5,85	5,97	6,09
S-2	2,699	27,3	5,30	4,85	4,40
Solo-cal (0 dias)					
S-1 (5% cal)	--	26,2	11,98	11,96	11,94
S-2 (3% cal)	2,748	25,9	12,78	12,09	13,25

Obs: G_s = densidade real inicial do solo; w_{ot} = umidade ótima.

Com a adição da cal ao solo, ocorreu um aumento do pH (em H₂O e em KCl) para o tempo de 0 dias, chegando a ultrapassar o PCZ do solo *in natura* para o S-1, conforme Figura 4.

Ao longo dos 200 dias de observação para o solo S-2, verificou-se uma redução nos valores de pH em água e KCl e do PCZ calculado. Esta redução foi de maior amplitude nos três primeiros dias para o pH em água e nos primeiros 14 dias para o pH em KCl e para o PCZ.

Decorridos estes períodos iniciais para o solo S-2, as variações se tornam pequenas até os 60 dias quando o pH em água e KCl e, por consequência, o PCZ tornam-se iguais. Para o solo S-1, as variações foram mais suavizadas, desde o tempo 0 até 60 dias de análise da mistura solo-cal e o ponto de equilíbrio entre o pH em H₂O e KCl e PCZ foi praticamente o mesmo para os dois solos analisados.

A partir dos 60 dias, para S-2, o pH em H₂O torna-se superior ao pH em KCl, tornando o PCZ inferior a ambos, sendo importante observar que as variações passam então a serem mais acentuadas nos três parâmetros. Já para S-1, o comportamento foi ao contrário: o pH em H₂O foi menor que o pH em KCl e o PCZ tornou-se superior a ambos.

Com o pH em H₂O ultrapassando o pH em KCl, o solo S-2, que tinha uma capacidade de troca aniônica, passou a ter o comportamento catiônico. A mudança do solo de CTA para CTC indica que a reação do hidróxido de cálcio (íons OH⁻) com o solo está gerando silicato ou aluminato de cálcio hidratado, e conseqüentemente, reduzindo o pH ao longo do tempo. Já para o solo S-1, o mesmo apresentou comportamento aniônico.

As variações ao longo do tempo com redução nos valores de pH apontam para a penetração de parte da química da cal nos agregados sendo provavelmente favorecida essa penetração após os 60 dias, conforme estudo realizado por Fernandes (2022). Esta observação é importante, pois esses elementos e/ou compostos químicos provenientes da cal ao penetrarem nos agregados poderão ampliar ou reduzir a estabilidade dos agregados a depender do solo, conforme resultados mostrados



Paulo Costa Fernandes,
 Gisandra Faria de Paula,
 Dan Imbroisi Brant Teixeira,
 Rafael Cerqueira Silva

por Ayala (2020) e Wanderley Neto (2020) para um solo laterítico, cujas agregações perderam estabilidade com o tempo em função, respectivamente, da presença de cal e de cimento Portland.

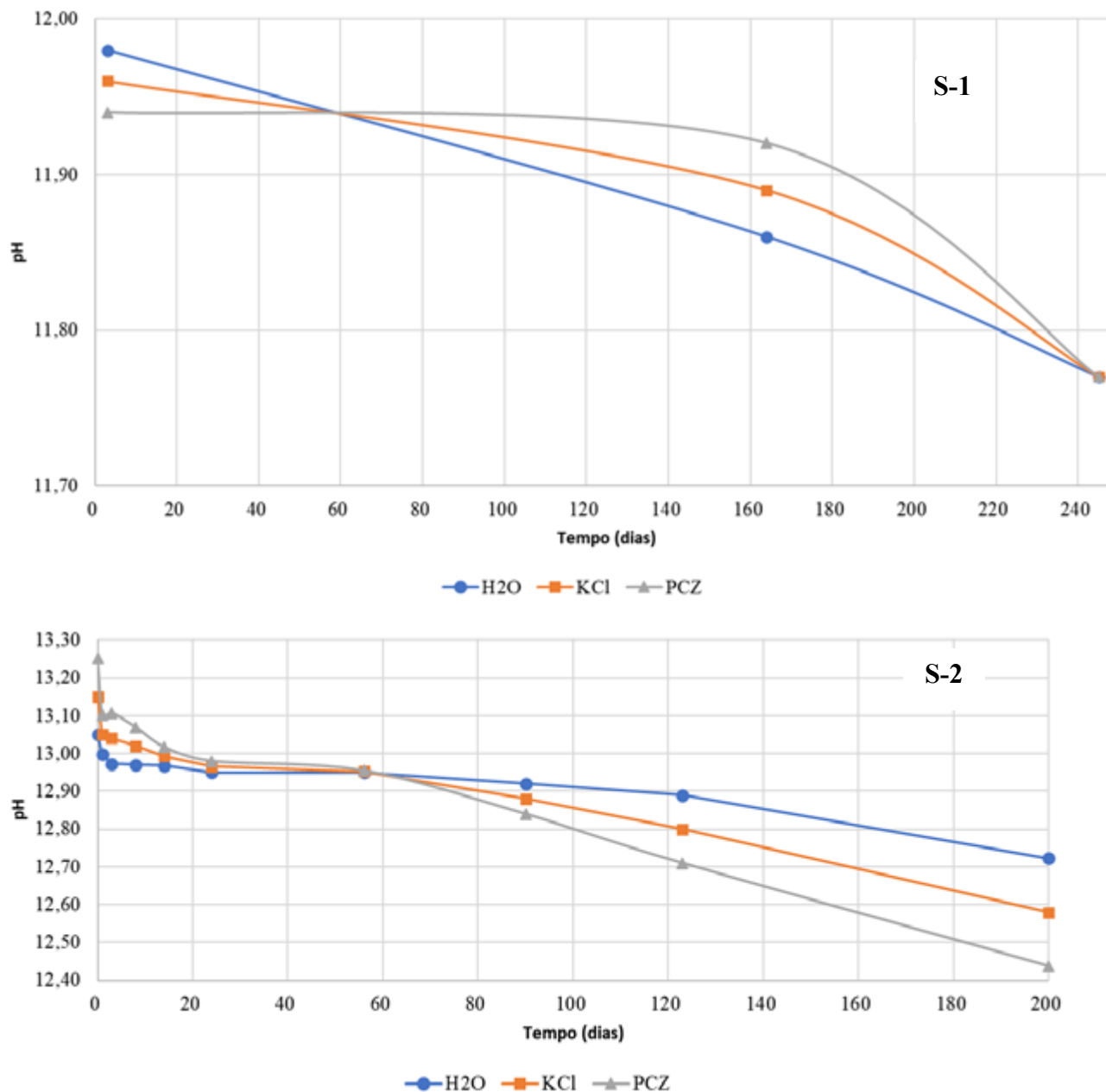


Figura 4. Variação do pH com o tempo para os solos S-1 e S-2.

Com o intuito de verificar a curva do teor ótimo de cal, conforme a norma DNIT 419/2019, foram elaboradas, para o solo S-2, as curvas do teor ótimo de cal da mistura solo-cal, na umidade ótima de campo, tanto em H₂O quanto em KCl, conforme Figura 5.



DOI: 10.29327/1430212.49-26

ESTUDO DA VARIAÇÃO DO PH AO LONGO DO TEMPO
EM DOIS SOLOS DO DISTRITO FEDERAL MELHORADOS COM CAL

Observa-se uma estabilidade das leituras no meio aquoso após o teor de 2%, fato que só se observa no meio em KCl após 5%. Tal fato se justifica porque o meio em KCl é mais dissociativo para os íons de H^+ , sendo necessário saturar o meio com a cal para que haja a estabilização dos valores.

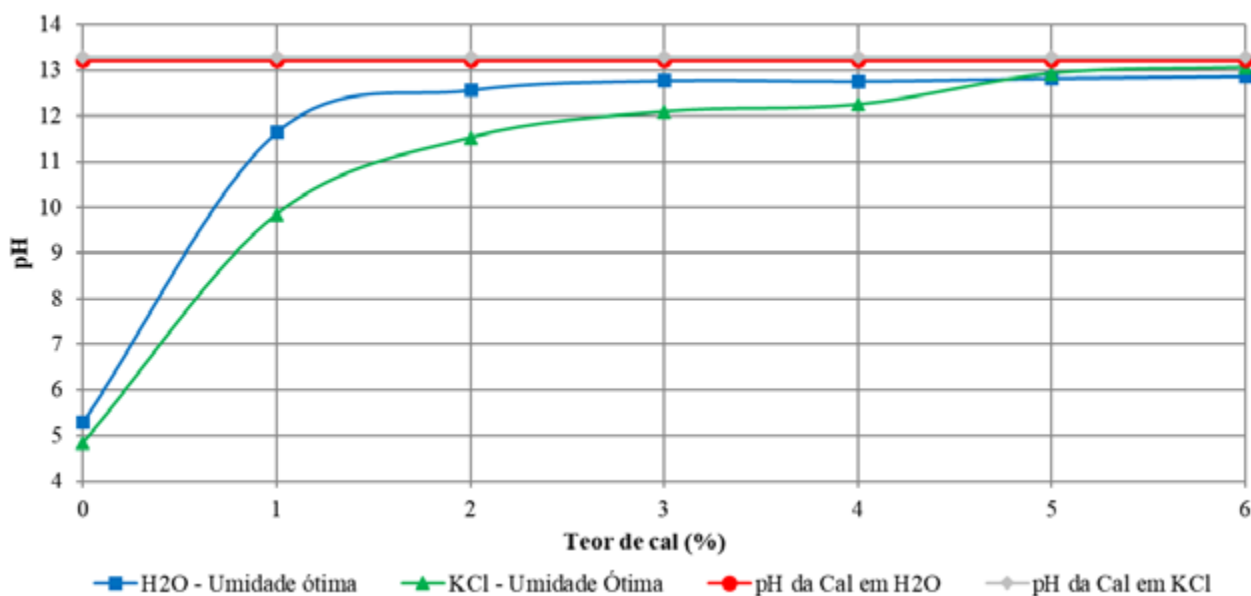


Figura 5. Curvas do teor de cal para S-2.

Os valores de pH obtidos da cal em H_2O (13,22) e em KCl (13,29) ficaram bem próximos, indicando proximidade da saturação dos íons H^+ no meio aquoso.

A alteração da curva do pH em KCl – umidade ótima indica que o teor de umidade pode influenciar nas leituras obtidas no pHmetro. Para teores de cal elevados (superiores a 5%), o pH em KCl e em H_2O convergem aos mesmos valores apontando um estado limite e saturação do material com o aditivo químico.

A adoção de 3% de cal em projeto para melhorar o solo S-2 foi, em princípio, assertiva, pois, em 2018, ano em que o solo estudado foi utilizado na implantação da ciclovia pelo DER-DF, não era normatizada a adoção de teores mínimos de cal pelo critério de pH. Porém, como pode ser observado, na Figura 5, os valores extraídos ficaram acima do valor previsto em norma (12,40), sendo obtido no material, na umidade ótima, valor de 12,78.

CONCLUSÕES

Segundo Prado (2022), a agregação torna-se máxima quando o pH coincide com o PCZ e passa a diminuir quando dele se afasta. Assim, a contextualização temporal das análises realizadas torna-se muito relevante, pois as mudanças ocorridas na química do meio darão origem a novos valores de pH em água e KCl, gerando novos PCZ.

Para os dois solos analisados, o ponto dissociativo entre o pH em H_2O e KCl e o PCZ ocorreu próximo de 60 dias, o que pode gerar comportamentos não esperados e, portanto, tais dados devem ser levados em consideração quando se realizar coletas de material da camada, após o término dos serviços.

Atingido o equilíbrio, estas novas condições se constituirão em referência para comportamentos que poderão advir de outras intervenções químicas no meio.



Cabe ainda destacar que, no caso de solos lateríticos contendo agregações, o equilíbrio químico entre o meio e a globalidade das partículas integrando o solo levará certo tempo, o que amplia a importância da presente análise da variação do pH da mistura solo-cal com o tempo (AYALA, 2020; FERNANDES, 2022).

Verifica-se também uma variação do pH para as amostras solo-cal estudadas, observando-se uma tendência de diminuição no valor de pH com o passar do tempo. Tal redução pode estar associada a reações químicas, bem como com a migração química para o interior dos agregados do solo o que, ocorrendo, requer maiores análises devido ao risco de solubilização dos oxi-hidróxidos de ferro.

Ao analisar variações do pH após longo tempo, faz-se necessário levar em consideração este decréscimo do pH. Fernandes (2022), ao comparar os resultados obtidos para o solo composto a base de uma ciclovia no DF, com incorporação de 3% de cal, após 2 e 3 anos de sua compactação *in situ*, verificou que as diferenças registradas para o mesmo solo com 3% de cal em laboratório colocam como uma das possibilidades muito prováveis a ocorrência de migração química da cal para as camadas inferiores e laterais da estrutura do pavimento.

Assim, as análises realizadas apontam para a necessidade de aprofundar os estudos sobre a evolução de parâmetros químicos como o pH e sobre a migração química que ocorre *in situ* quando da execução de uma camada contendo solo-cal, pois, com o passar dos anos, esta mudança de valores no pH pode ocorrer no sentido de sua diminuição, sendo necessário não somente analisar a camada que foi estabilizada quimicamente bem como as camadas adjacentes e o seu comportamento físico e mecânico.

Outro ponto importante é que, por sua simplicidade, baixo custo e rapidez, o ensaio de pH pode ser adotado no controle de execução de obras em que o solo seja melhorado ou estabilizado quimicamente com cal. A utilização de pHmetros portáteis garantirá, assim, maior confiabilidade na realização do controle tecnológico de camadas de pavimento em solo-cal.

Por fim, torna-se necessário estudos mais aprofundados em outros tipos de solos do DF e de outras regiões do país para esta verificação, bem como a influência do tipo de água adotada em campo face aos resultados obtidos em laboratório pelo estudo de Fernandes (2022).

AGRADECIMENTOS

À Diretoria de Estudos Tecnológicos (DITEC), unidade da Superintendência Técnica (SUTEC) do DER-DF, pela disponibilização do laboratório de solos para a realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ayala, R. J. L. (2020). Melhoria de solos com fibras provenientes da indústria avícola. Tese de doutorado, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 300p.

Camapum de Carvalho, J.; Gitirana Junior, G. F. N.; Machado, S. L.; Mascarenha, M. M. A.; Silva Filho, F. C.; *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico (2023). Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS. São Paulo, SP, 2ª edição, 1082 p.

Cardoso, F. B. F. (2002). Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central brasileiro. Tese de Doutorado, G.TD-009A/2002, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 407 p.

Castro, F. J. C. O. (1995). Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização). Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 344 p.

DER-DF, Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (2015). Unidades pedológicas do Distrito Federal – Planta. Adaptado Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA). Obtido junto à



DOI: [10.29327/1430212.49-26](https://doi.org/10.29327/1430212.49-26)

ESTUDO DA VARIAÇÃO DO PH AO LONGO DO TEMPO
EM DOIS SOLOS DO DISTRITO FEDERAL MELHORADOS COM CAL

Diretoria de Meio Ambiente do DER-DF (DIMAM).

DER-DF, Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (2021). Licitações Disponível em <<https://www.der.df.gov.br/licitacoes/>>. Acesso em 12 de outubro de 2021.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2019b). 419: Pavimentação – Solo-Cal – Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo – Método de ensaio.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 3ª Ed. Rio de Janeiro, RJ. 574 p.

Fernandes, P. C. (2022). Estudo da migração química em solo laterítico melhorado com cal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM - 370/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

Grim, R. E. (1962). Applied Clay Mineralogy. McGraw-Hill, Califórnia, EUA. 422 p.

Herrin, M. & Mitchell, H. (1961). Soil lime mixtures. Highway Research Board, 99: 138 p.

Keng, J. C. W.; Uehara, G. (1974). Chemistry, mineralogy and taxonomy of Oxisols and Ultisols. Proceedings of Soil Crop Science Society of Florida, v. 33, p.119-126.

Lima, M. C. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-17A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 336 p.

Little, D.N. (1995). Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, United States of America, 244 p.

Prado, H. do. Pedologia Fácil (2022). 6ª Ed. Editora do autor. 271p.

Rocha, M. T. & Rezende, L. R. (2016). Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. Revista Matéria, 22(4): 1-25.

Silva, M. F. da (2016). Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico. Universidade de São Carlos, São Carlos, SP. 118 p.

Teixeira, D. B. I.; Marino, D. M., Paula, G. F., Camapum de Carvalho, J. (2019). Estudo da estabilização química de um solo tropical do Distrito Federal com adição de cal. 21º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Brasília, DF. 9 p.

Wanderley Neto, R. V. (2020). Estudo experimental de interfaces solo-concreto no contexto de solos não saturados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM - 344/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 206 p.



MELHORIA DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS A PARTIR DA TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS COM FIBRAS NATURAIS DE AÇAÍ E COCO

Mayara Luana de Jesus Santos¹; Michéle Dal Toé Casagrande²

RESUMO

Na engenharia geotécnica, é fundamental explorar alternativas para viabilizar obras em solos com baixa capacidade de suporte. Uma estratégia eficaz é o reforço do solo com fibras, seja em estradas não pavimentadas ou em aterros sobre solos moles. No entanto, o custo das fibras sintéticas muitas vezes torna sua aplicação inviável. Uma alternativa mais econômica e amplamente estudada é o uso de fibras naturais. No norte do Brasil, o descarte inadequado das fibras de açaí, um subproduto da produção de polpa de açaí, representa um desafio considerável. Além disso, a problemática do descarte inadequado da casca de coco verde persiste em todo o país, especialmente nas regiões litorâneas. Em busca de soluções geotécnicas mais sustentáveis, o desenvolvimento de novos materiais geotécnicos tem como objetivo não apenas melhorar a resistência dos compósitos solo-fibra, mas também encontrar usos mais apropriados para as fibras de açaí e de coco, trazendo benefícios técnicos, ambientais, financeiros e sociais. Este estudo investigou o comportamento físico e mecânico de um solo argiloso tropical reforçado com diferentes proporções de fibras de açaí e de coco. Foram realizados ensaios de compactação, resistência à compressão simples e tração direta nas fibras. Os resultados demonstraram que os compósitos solo-fibra apresentaram melhorias nos índices de compactação, além de maior resistência, tanto de pico quanto pós-pico, em comparação com o solo puro. As fibras também exibiram uma notável resistência à tração, indicando que são uma opção viável para projetos geotécnicos.

PALAVRAS-CHAVE: Estradas não Pavimentadas; Reforço de Solo; Fibras de Açaí; Fibras de Coco; Geotecnia ambiental.

ABSTRACT

In geotechnical engineering, it is crucial to explore alternatives to enable construction on soils with low bearing capacity. An effective strategy is soil reinforcement with fibers, whether in unpaved roads or embankments on soft soils. However, the cost of synthetic fibers often renders their application unfeasible. A more economical and widely studied alternative is the use of natural fibers. In the northern region of Brazil, the improper disposal of açai fibers, a byproduct of açai pulp production, poses a significant challenge. Additionally, the issue of improper disposal of green coconut husks persists throughout the country, especially in coastal regions. In pursuit of more sustainable geotechnical solutions, the development of new geotechnical materials aims not only to improve the strength of soil-fiber composites but also to find more suitable uses for açai and coconut fibers, bringing technical, environmental, financial, and social benefits. This study investigated the physical and mechanical behavior of tropical clay soil reinforced with different proportions of açai and coconut fibers. Compaction tests, unconfined compression tests, and direct tensile tests on the fibers were conducted. The results showed that the soil-fiber composites improved compaction indices and exhibited greater peak and post-peak strength compared to the pure soil. The fibers also demonstrated notable tensile strength, indicating their viability for geotechnical projects.

KEY WORDS: Unpaved Roads; Soil Reinforcement; Açai Fibers; Coconut Fibers; Environmental Geotechnics.

¹ Universidade de Brasília, mayaraluana.ml@gmail.com

² Universidade de Brasília, mdtcasagrande@unb.com.br



DOI: [10.29327/1430212.49-56](https://doi.org/10.29327/1430212.49-56)

MELHORIA DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS A PARTIR DA TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS COM FIBRAS NATURAIS DE AÇAÍ E COCO

INTRODUÇÃO

Certamente é um grande desafio da engenharia geotécnica adaptar suas obras para que, mesmo sobre solo não favoráveis, sejam construídas obras de grande e médio porte. Existem aquelas obras que são temporárias, mas não deixam de ser necessárias e relevantes como por exemplo aterros temporários e estradas não pavimentadas que servem de acesso a localidades mais restritas. Dessa forma, é preciso buscar alternativas de melhorar a capacidade de suporte do solo de modo que não se tenham grandes gastos, e que não agrida tanto o meio ambiente.

No Brasil, o transporte rodoviário é o principal meio de movimentação de mercadorias, serviços e pessoas, representando cerca de 60% de todas as atividades de transporte no país. Aproximadamente 86% das estradas não possuem pavimentação e frequentemente estão em condições precárias, (CNT, 2022). A maioria dessas estradas servem como elo entre cidades, vilas e distritos, sendo vitais para conduzir a comunidade aos centros urbanos e proporcionar acesso a serviços essenciais como hospitais e escolas. Conforme observado por Pitilin (2020), os principais problemas enfrentados por essas estradas incluem a falta de sistemas de drenagem, o abaulamento do leito, a ausência de cascalho como superfície de rolamento, presença de agregados soltos, buracos, trilhas de rodas, corrugações e poeira.

Dessa maneira, pensando em melhorar as propriedades do solo das estradas não pavimentadas, por exemplo, pode-se recorrer a técnica de inclusão de fibras, que atuam como elementos de reforço que não impedem a formação de fissuras, mas atuam diretamente no controle da propagação destas, melhorando as propriedades mecânicas do material compósito em questão (Casagrande, 2001).

Esse método já vem sendo consagrado na literatura e nas obras geotécnicas, em razão de, conforme Casagrande (2005), ser capaz de conferir aos solos, aumento da resistência, da ductilidade e da tenacidade, e a diminuição da queda de resistência pós-pico. Sendo assim, o uso dessas fibras que em sua maioria são fabricadas com produtos poliméricos é muito procurado pelos engenheiros. No entanto, o alto custo das fibras sintéticas, o fato de não ser um material renovável e de não contribuir com a conservação ambiental faz com que alternativas de produção de fibras sejam almejadas pelos profissionais da área.

Portanto as fibras naturais, que são renováveis e sustentáveis, podem ser aplicadas e seu uso já é observado na literatura. Assim, confrontando com as fibras sintéticas, as naturais incluem também aspectos ecológicos e sociais, em razão da melhor reciclabilidade e biodegradabilidade e do aumento da qualidade de vida dos habitantes de regiões onde é realizado o cultivo (Joeques, 2013). Pode-se citar, como exemplo, as muralhas da Mesopotâmia (1400 A.C.), existentes ainda hoje, que foram construídas empregando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Índícios do emprego desta técnica também são encontrados em partes da Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, através do emprego de lã de lhama como reforço.

Estudos mais recentes podem ser citados, como por exemplo Lopes (2022) que realizou ensaios de caracterização, compressão simples e cisalhamento direto em amostras de solo argiloso e de solo arenoso, com a inserção aleatória de fibras de açaí em ambos os solos, nos teores de 0,5% e 1,0% de fibras, em relação ao peso do solo seco. Esse autor demonstrou que a adição das fibras de açaí



melhorou significativamente as propriedades mecânicas do solo, alterando o comportamento de ruptura do material e proporcionando uma maior resistência de pico, bem como diminuição da queda de resistência pós-pico e maior resistência ao cisalhamento, quando a mistura solo-fibra se compara ao solo puro.

A escolha pelo uso de fibras de açaí é uma alternativa de suma relevância, afinal são provenientes dos caroços da fruta que se tornam resíduos após a retirada da polpa. No Brasil, especialmente Norte do país no Estado do Pará, o cultivo e consumo do açaí é extremamente significativo, pois a polpa do fruto é culturalmente a base alimentar de grande parte da população. Por consequência o descarte dos caroços gera grande quantidade de resíduo sólido. Conforme dados do IBGE (2023), em 2020, foram produzidas aproximadamente 220.489 mil toneladas de açaí, estimando-se uma geração de cerca de 177 mil toneladas de resíduos orgânico, constituído principalmente de caroços descartados em aterros sanitários e cursos d'água por exemplo, que podem causar um significativo passivo ambiental.

Além das fibras de açaí, as fibras de coco verde também se destacam como uma opção promissora na geotecnia, especialmente em projetos de infraestrutura. Elas oferecem um desempenho satisfatório, são economicamente viáveis e representam uma oportunidade importante de aproveitamento de resíduos que, de outra forma, seriam descartados inadequadamente, muitas vezes poluindo o meio ambiente.

Conforme destacado por Rocha et al. (2015), a casca do coco corresponde a uma grande parte da massa total do fruto, representando cerca de 85%, e é frequentemente considerada como lixo. As fibras presentes na casca possuem uma vida útil em campo que varia entre 2 e 10 anos, o que as torna adequadas para aplicações em obras geotécnicas, especialmente em projetos temporários, como apontado por Hejazi et al. (2012). Adicionalmente, conforme mencionado por Faustino (2022), o alto teor de lignina, cerca de 40%, presente nas fibras de coco confere durabilidade ao material. Isso, aliado à quase inércia das fibras e sua alta porosidade, torna o aproveitamento da casca de coco verde altamente vantajoso. A facilidade de produção, obtenção, baixo custo e ampla disponibilidade são outras características favoráveis desse material.

Sendo assim, buscar soluções para viabilizar as obras temporárias mais sustentáveis, que é o caso de melhorar, mesmo que temporariamente, as condições de estradas não pavimentadas, e destinar adequadamente o resíduo das fibras de açaí e das fibras de coco é de grande valia para a geotecnia e para o meio ambiente. À vista disso, o presente estudo objetiva, estudar o comportamento de compósitos adicionados com as fibras supracitadas no teor de 1,0% e 2,0%, por meio de ensaios geotécnicos, a fim de verificar seu comportamento no solo de análise.

MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, são apresentados os materiais estudados para verificar o comportamento das fibras de açaí e fibras de coco como reforço em solos de estradas não pavimentadas. Nos compósitos, foi utilizado como matriz um solo argiloso típico de regiões tropicais, tanto com quanto sem a incorporação das fibras, sendo submetido a uma série de ensaios, incluindo compactação, compressão simples e tração direta das fibras.



DOI: 10.29327/1430212.49-56

MELHORIA DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS A PARTIR DA TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS COM FIBRAS NATURAIS DE AÇAÍ E COCO

Solo Argiloso Laterítico Utilizado na Análise

Do Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília foi coletado um solo argiloso laterítico. Dessa forma, foi realizado ensaio de granulometria, onde foi possível verificar que se tratava de um solo composto em sua maior parte por fração de argila, representando 53,3%, seguido por 36% de areia e 10,7% de silte (Figura 1). A massa específica real dos grãos do solo puro, obtido no pentapycnometro, foi de 2,70 g/cm³. Quanto aos limites de consistência foi encontrado um valor de Limite de Liquidez de 42% e um valor de Limite de Plasticidade de 27%, resultando em um Índice de Plasticidade de 15%. A partir dos resultados dos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, foi possível classificar o solo de acordo com a Classificação TRB, em um material argiloso, pertencente ao grupo A-7-6 e com Índice de grupo igual a 10. Este material é considerado de regular a mau comportamento para aplicação em pavimentos.

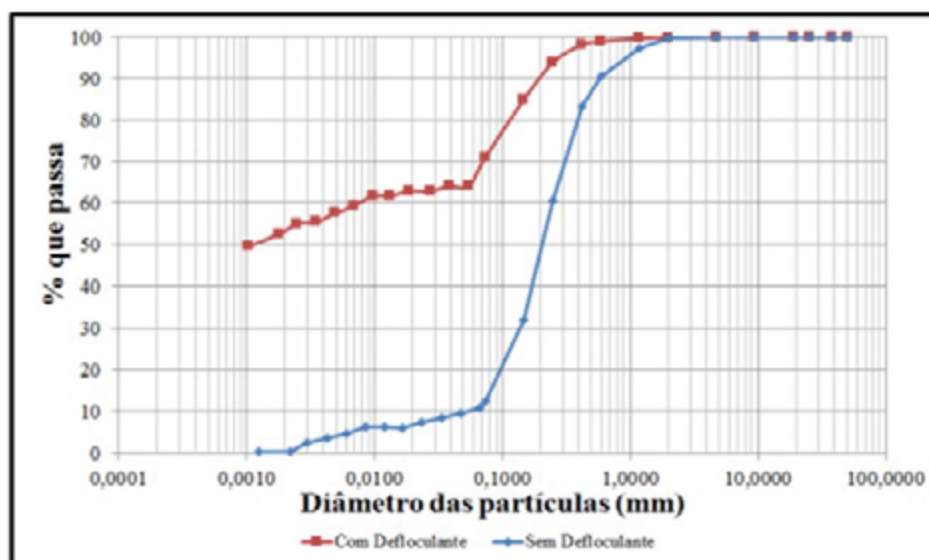


Figura 1. Curva granulométrica do solo (Autora, 2023).

Fibras de açaí estudadas

As fibras de açaí (Figura 2) utilizadas na pesquisa foram obtidas a partir de resíduos de açaí, os quais foram coletados após a retirada da polpa. Para a obtenção das fibras, foi realizada uma parceria com a Universidade Federal do Pará (UFPA), que dispunha de uma máquina capaz de separar as fibras do caroço. Essas fibras são comumente encontradas em áreas do nordeste paraense sem destinação adequada, sendo frequentemente encontradas em ruas, leitos de rios e lixões. O diâmetro e comprimento delas também foram considerados fatores importantes, pois afetam diretamente as propriedades mecânicas do material compósito final. No entanto, devido à origem natural das fibras de açaí, suas dimensões variam mesmo dentro de uma mesma amostra. Portanto, as utilizadas neste estudo apresentaram diâmetros variando em cerca de 0,10 mm a 0,18 mm e comprimentos de 6 mm a 20 mm.



Figura 2. Fibras de açai (Autora, 2023).

Fibras de coco estudadas

As fibras de coco ilustradas na Figura 3(a) foram adquiridas da empresa Hobby Verde que comercializa vários tipos de fibras naturais. Essas fibras são consideradas um material sustentável, pois são obtidas a partir de resíduos de coco, um subproduto da indústria de alimentos. Essas fibras foram fornecidas em comprimentos consideráveis (cerca de 90 mm), então foi necessário cortá-las em um tamanho previamente determinado, mostrado na Figura 3(b) para que se tornassem relativamente parecidas, em termo de comprimento, com os outros materiais de reforço analisados nesta pesquisa. Dessa maneira, as fibras foram desembaraçadas manualmente, uma a uma, e cortadas em comprimentos de aproximadamente 15 mm.



Figura 3. (a) Fibras de Coco antes de cortadas. (b) Fibras de Coco com 15 mm de comprimento (Autora, 2023).



DOI: [10.29327/1430212.49-56](https://doi.org/10.29327/1430212.49-56)

MELHORIA DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS A PARTIR DA TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS COM FIBRAS NATURAIS DE AÇAÍ E COCO

Métodos

O programa de ensaios estabelecido tem como objetivo principal investigar e identificar o efeito da adição de fibras de açaí e coco nas propriedades mecânicas de um solo tropical laterítico argiloso. Desta forma, foi desenvolvido um programa experimental que se baseia em três etapas:

- (i) ensaio de compactação MCT com base na norma DNER-ME 228/23 Solos - Compactação em Equipamento Miniatura;
- (ii) ensaio de compressão não confinada em corpos de prova sem reforço, para fins comparativos, e em compósitos solo-fibras de açaí e com fibras de coco. Com base na NBR 12770 (ABNT, 2022);
- (iii) para avaliação da resistência das fibras utilizadas como reforço, foram realizados ensaios de tração direta. Além da resistência, esse ensaio permite determinar módulo de elasticidade e alongamento na ruptura, sendo fundamental para explicar o comportamento desses materiais. Para tanto seguiu-se as recomendações da ASTM C1557 (2020) e foi usada uma prensa universal (Materialprufung 1445, Zwick, Alemanha), a uma velocidade de 0,1 mm/min.

Foram moldados corpos de prova (moldes cilíndricos com 50 mm de diâmetro) com teores de 1,0% e 2,0% de fibras, em relação ao peso do solo seco, bem como um corpo de prova sem adição de fibras para fins comparativos, todos em tréplica.

RESULTADOS

Nessa sessão, apresenta-se os resultados dos ensaios descritos acima, que visam verificar a eficiência as fibras naturais de açaí e coco como reforço de solo tropical aplicado a base de estradas não pavimentadas.

Ensaio de Compactação

A Figura 4 abaixo, apresenta as curvas de compactação do solo sem reforço e o solo reforçado com 1,0% e 2,0% das fibras de açaí e coco. Nota-se que a adição das fibras de açaí ao solo resultou em uma diminuição gradual do peso específico seco aparente do solo para os compósitos. Passou de 19,51 kN/m³ do solo sem reforço para 19,20 kN/m³ do solo reforçado com 1,0% das fibras de açaí e 18,78 kN/m³ para o solo com adição de 2,0% de fibra. Enquanto ocorreu um aumento progressivo da umidade ótima: 22,54% no solo sem reforço para 22,63% e 23,02% nos solos reforçados com 1,0% e 2,0% respectivamente.

Conforme Mirzababaei et al. (2013), a diminuição do peso específico seco máximo está relacionada com a diferença entre a densidade das partículas do solo em comparação com a das fibras. Sendo assim, essas mudanças indicam também possíveis mudanças nas propriedades mecânicas da mistura com a adição de fibras.

Quanto as fibras de coco, nota-se que a adição destas ao solo no teor de 1,0% fez com que o compósito se apresente peso específico seco aparente menor. Passou de 19,51 kN/m³ do solo sem reforço para 19,21 kN/m³ do solo reforçado com 1,0% de coco. E um aumento no teor de umidade



que passou de 22,54% para 24,82%. Da mesma forma ocorreu para os compósitos reforçados com 2,0% de fibra de coco, que passou de 19,51 kN/m³ do solo não reforçado para 18,86 kN/m³. E o teor de umidade ótimo passou de 22,54% para 26,80%.

Em conformidade com as conclusões de Al-Wahab & Al-Qurna (1995) que avaliaram os efeitos da inclusão de vários teores de fibra na curva de compactação de uma argila e encontraram um decréscimo da massa específica aparente seca máxima e um acréscimo na umidade ótima para a adição de 2,0% de fibra.

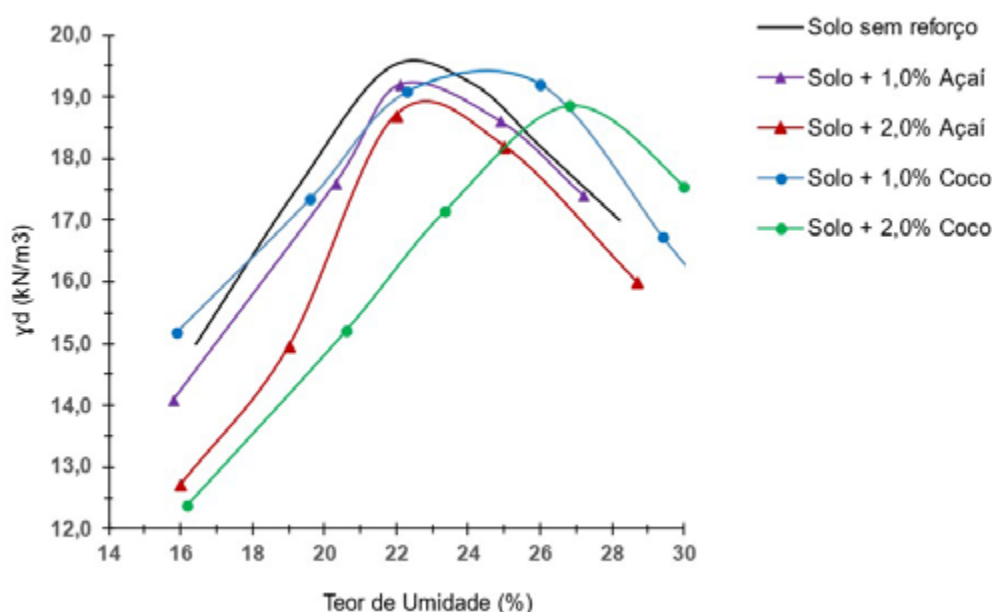


Figura 4. Curvas de Compactação (Autora, 2023).

Ensaio de Compressão Simples

Com os resultados dos ensaios de compressão simples pode-se plotar os gráficos conforme a Figura 5. É possível observar que a adição aleatória das fibras de açaí ao solo resultou em um aumento na tensão máxima suportada pelo solo. Enquanto o solo sem reforço apresentava uma tensão de pico de 345 kPa, essa tensão aumentou para 1059 kPa quando o solo foi reforçado com 1,0% de fibras de açaí. No caso do solo reforçado com 2,0% de fibras, a tensão de pico alcançou 1275 kPa.

Além disso, a deformabilidade do solo na ruptura também aumentou com a adição das fibras. Enquanto o solo sem reforço apresentou uma deformação de 1,43%, essa deformação aumentou para 2,82% no caso do solo reforçado com 1,0% de fibras e para 2,54% no caso do solo reforçado com 2,0% de fibras. Resultados semelhantes foram obtidos por Lopes & Casagrande, (2022), que realizaram um estudo no qual adicionaram 0,5% e 1,0% de fibras de açaí ao solo. Eles observaram um aumento na resistência de pico de 156% e 250% em relação ao solo sem reforço, respectivamente.



DOI: 10.29327/1430212.49-56

MELHORIA DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS A PARTIR DA TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS COM FIBRAS NATURAIS DE AÇAÍ E COCO

No que diz respeito ao comportamento após o pico das curvas de resistência à compressão não confinada, foi possível observar que ambos os teores de fibras mantêm valores elevados durante essa fase. Isso confere ao solo uma resistência que não era suportada antes do reforço. A adição desse tipo de fibra também resultou em uma modificação no mecanismo de ruptura do solo.

Semelhante, pode-se notar com a adição das fibras de coco ao solo que resultou em um aumento na tensão de pico do solo, a qual era de 345 kPa quando o solo não estava reforçado e passou a ser de 537 kPa para o solo reforçado com 1,0% de fibra de coco. No caso do solo reforçado com 2,0%, a tensão de pico chegou a 668 kPa. Da mesma forma, há um aumento na deformabilidade do solo, que passou de 1,43% de deformação no solo sem reforço para 1,67% nos dois teores estudados. Resultados semelhantes foram observados por Babu & Vasudevan (2007), em seu estudo onde também adicionaram 1,0% e 2,0% de coco, confirmando que esse reforço é eficiente para aumentar a resistência e rigidez do solo argiloso investigado por eles.

No que se refere ao comportamento durante os pós pico das curvas de resistência a compressão não confinada, observou-se que ambos os teores de fibra, mantêm os valores ainda altos durante o pós-pico. Conferindo ao solo uma resistência que antes de reforçado ele não suportava. O acréscimo de fibras resultou em uma alteração no mecanismo de ruptura. Foi observado um comportamento de endurecimento elasto-plástico (*strain-hardening*) nos compósitos reforçados com fibras de coco, em que a resistência aumenta constantemente com o aumento da deformação axial em todas as amostras de solo reforçado testadas.

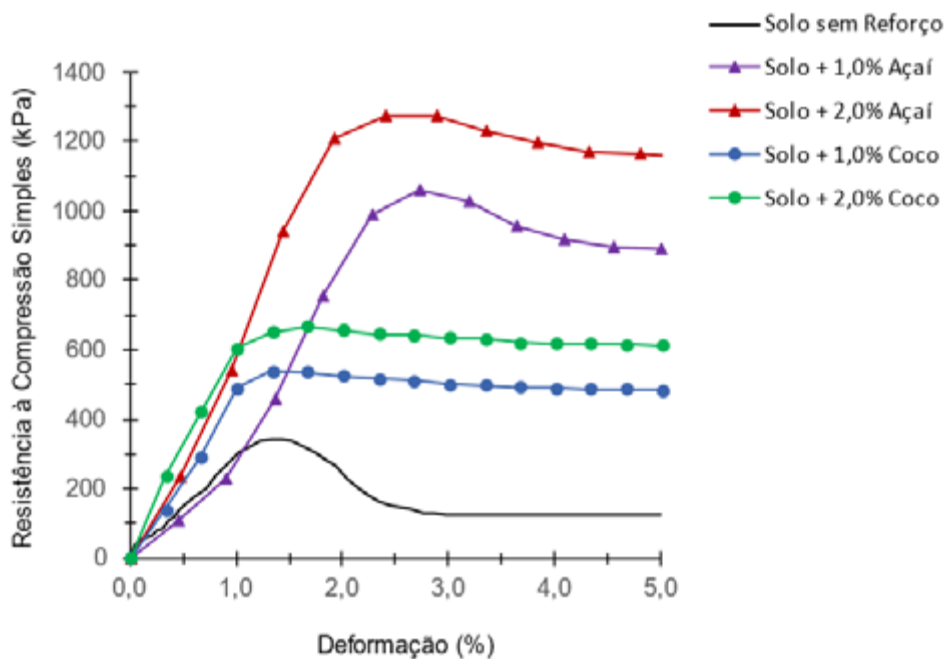


Figura 5. Curvas de Resistencia à Compressão Simples (Autora,2023).



Ensaio de Tração Direta nas Fibras

As fibras de açaí apresentaram um valor médio de resistência à tração de 249,72 MPa, o que é comparável ao valor de resistência à tração registrado para as fibras de sisal estudadas por Silveira (2018), que alcançou 270,86 MPa. Vale destacar que, apesar da área da seção transversal das fibras de açaí estar mais próxima daquelas das fibras de curauá (0,004 mm²), o comportamento na resistência à tração é semelhante à das fibras de sisal.

Em relação ao módulo de elasticidade, as fibras de açaí apresentaram um valor médio de 3,73 GPa, ligeiramente inferior ao valor obtido para as fibras de sisal, que foi de 5,51 GPa. Quanto ao alongamento na ruptura, as fibras de açaí exibiram um valor médio de 7,83%, o que é maior do que o alongamento de 5,21% observado nas fibras de sisal.

Já para as fibras de coco submetidas ao ensaio de tração direta, tem-se que o valor médio foi de 130 MPa, o que está em conformidade com o resultado encontrado por Bernardina (2019), que obteve uma resistência ligeiramente maior, de 151 MPa. No entanto, o valor médio de 130 MPa ainda se encontra dentro da média dos valores previstos. Em relação ao módulo de elasticidade, o valor encontrado neste estudo foi de 0,78 GPa, o que é menor do que o valor observado pela autora citada anteriormente em seu estudo que foi de 1,62 GPa. Quanto aos valores de alongamento na ruptura, também foram inferiores aos observados por ela, que apresentou um valor de aproximadamente 45,10%, enquanto neste estudo o valor foi de 21,94%.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, fica evidente que a incorporação de fibras de açaí e de fibras de coco como reforço para solos argilosos tropicais é altamente promissora do ponto de vista geotécnico. As fibras aumentam significativamente os parâmetros de resistência a compressão simples do solo e proporcionam uma resistência adicional pós-pico, são fibras com alto potencial de resistência a tração, absorvendo assim maior quantidade de energia. Além disso, ao mesmo tempo oferecem uma solução sustentável para os resíduos da produção de polpa de açaí e do descarte inadequado das cascas de coco verde.

Portanto, essa abordagem representa uma alternativa viável para a melhoria de estradas não pavimentadas, particularmente em estradas de acesso local e pouco tráfego, sendo uma solução viável temporariamente. Essa pesquisa é inovadora ao introduzir um novo material geotécnico com potencial de mercado, benefícios ambientais e custo acessível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. (2022). Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. NBR ISSO 12770. Rio de Janeiro.

Al-Wahab, R.; & Al-Qurna, H. (1995). Fiber reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures. the GEOSYNTHETICS'95 CONFERENCE. v. 2, 433–466.



DOI: [10.29327/1430212.49-56](https://doi.org/10.29327/1430212.49-56)

MELHORIA DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS A PARTIR DA TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS COM FIBRAS NATURAIS DE AÇAÍ E COCO

American Society For Testing And Materials (2008). Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers: ASTM C1557. West Conshohocken, Pennsylvania.

Babu, G. L. S., & Vasudevan, A. K. (2007). Evaluation of strength and stiffness response of coir-fibre-reinforced soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 11(3), 111–116. <https://doi.org/10.1680/grim.2007.11.3.111>

Bernardina, F. (2019). Influência da Degradação de Fibras no Comportamento Mecânico de Solos Reforçados. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 123 p. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.46468>

Casagrande, M. (2001). Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais. Dissertação de Mestrado, PPGEC, UFRGS, Porto Alegre, 94 p.

Casagrande, M. (2005) Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 219 p.

DNER – Departamanto Nacional De Estradas E Rodagem (2023). DNER-ME 228/23 “Solos – compactação em equipamento miniatura”.

Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., & Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 30, 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023), Produção da extração vegetal e silvicultura - PEVS, Rio de Janeiro.

Lopes, M. M., & Casagrande, M. (2022). Mechanical Improvement of a Reinforced Sand with Açai (*Euterpe oleracea*) Fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1260(1), 012025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1260/1/012025>

Mirzababaei, M., Miraftab, M., Mohamed, M., & McMahon, P. (2013). Unconfined Compression Strength of Reinforced Clays with Carpet Waste Fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(3), 483–493. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000792](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000792)

PITILIN, Giovani R. Aplicação de metodologia de avaliação de trafegabilidade das estradas rurais na microrregião de Toledo-PR. Dissertação (Mestrado) -Desenvolvimento Regional e Agronegócio, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2020.

Silveira, M. (2018) Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 148 p.



ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA TRAÇÃO A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BGTC

Verônica Janaína Melo Barreto Nunes¹; Fernando Silva Albuquerque²

RESUMO

O avanço dos estudos sobre as propriedades mecânicas do concreto de cimento Portland tem permitido uma compreensão mais aprofundada de seu desempenho em serviço, mesmo sem que todas as suas propriedades tenham sido determinadas experimentalmente. Algumas dessas relações podem ser observadas em normas técnicas, a exemplo da norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014). Este estudo realizou ensaios mecânicos em misturas de brita graduada tratada com cimento (BGTC), utilizando dois tipos de cimento Portland (CP II-F 32 e CP IV 32 RS), em dois teores do ligante hidráulico (3% e 5%) e duas idades (7 e 28 dias). O objetivo foi estabelecer relações entre a resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral com os resultados de ensaios de flexão (resistência à tração na flexão e módulo flexural) para BGTC, e analisar a influência do tipo de cimento, teor de ligante e tempo de cura nessas relações. As relações estabelecidas visam possibilitar a utilização de variáveis mais facilmente obtidas na previsão de parâmetros mecânicos, que de outra forma demandariam mais tempo, material e tecnologia. Essa abordagem permite não só prever o comportamento mecânico da mistura cimentada, mas também desenvolver um anteprojeto eficiente, com boa precisão em relação ao projeto executivo, momento em que os ensaios mais complexos seriam executados.

PALAVRAS-CHAVE: BGTC, cimentados, ensaios, compressão, flexão.

ABSTRACT

The advancement in studies regarding the mechanical properties of Portland cement concrete has enabled a deeper understanding of its performance in service, even without all its properties being experimentally determined. Some of these relationships can be observed in technical standards, such as the Brazilian standard NBR 6118 (ABNT, 2014). This study conducted mechanical tests on mixes of cement-treated crushed stones (CTCS), using two types of Portland cement (CP II-F 32 and CP IV 32 RS), at two binder contents (3% and 5%) and two ages (7 and 28 days). The objective was to establish relationships between simple compressive strength and splitting tensile strength with the results of flexural tests (flexural tensile strength and flexural modulus) for CTCS, and to analyze the influence of cement type, binder content, and curing time on these relationships. This aims to enable the use of more easily obtainable variables in predicting mechanical parameters, which would otherwise require more time, material, and technology. This approach not only allows predicting the mechanical behavior of the cementitious mixture but also developing an efficient preliminary design with good accuracy compared to the executive design, moment in which the more complex tests would be conducted.

KEY WORDS: CTCS, cemented, tests, compression, flexure.

¹ Universidade Federal de Sergipe, janaína.melo.eng@gmail.com; albuquerque.f.s@academico.ufs.br.



DOI: [10.29327/1430212.49-44](https://doi.org/10.29327/1430212.49-44)

ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA TRAÇÃO
A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BGTC

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para Albuquerque e Mendonça (2017), em locais com grandes volumes de tráfego, as bases ou sub-bases estabilizadas quimicamente com cimento Portland podem ser adotadas como uma solução estrutural para os pavimentos, a fim de melhorar seu desempenho e reduzir os investimentos financeiros em longo prazo, desde que o comportamento mecânico desses materiais seja conhecido e respeitado.

Nesse contexto, destaca-se a utilização da brita graduada tratada com cimento (BGTC), camada de base ou sub-base composta por mistura, em usina, de produtos de britagem, cimento e água, adequadamente compactada e submetida a processo eficiente de cura (DER/PR, 2018).

Com relação ao comportamento mecânico da BGTC, alguns parâmetros podem ser determinados para caracterizar a mistura cimentada, quais sejam: resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo dinâmico, módulo flexural, tenacidade e resistência à fadiga.

Apesar de isoladamente cada um desses parâmetros indicar uma tendência de desempenho do material frente a um carregamento específico, a relação entre as variáveis mecânicas pode auxiliar de maneira mais eficaz a escolha da melhor solução estrutural para um dado projeto, além de fornecer expressões a partir das quais se obtenham parâmetros que são determinados por ensaios mais complexos (que demandem mais tempo, maior quantidade de material ou tecnologia mais avançada) em função dos ensaios de simples execução, viabilizando o desenvolvimento de um anteprojeto com aproximação razoável do projeto executivo.

Conforme explicam Bernucci *et al.* (2006), em estruturas de pavimentos é esperado que as misturas apresentem baixa rigidez, para evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro. Por outro lado, espera-se também alta resistência à tração, pois a maior resistência na ruptura, de modo geral, é também associada a uma maior resistência à fadiga. Assim, a razão entre parâmetros de rigidez e resistência podem auxiliar na previsão do desempenho de camadas dos pavimentos.

A resistência à compressão é usualmente reconhecida como um importante indicador da qualidade da mistura de brita graduada tratada com cimento (XUAN *et al.*, 2012), conforme observado em normatizações nacionais a exemplo da NBR 11803 (ABNT, 2013) e das especificações técnicas ET-DE-P00/009 (DER/SP, 2005) e ES-P 16/18 (DER/PR, 2018), ou mesmo em referências estrangeiras, a citar as orientações do Manual de Pavimentação da África do Sul (SAPEM, 2014). Os avanços dos estudos sobre o concreto de cimento Portland possibilitaram estabelecer relações que envolvem a resistência à compressão simples (RCS) e as demais propriedades do concreto, como as expressões da NBR 6118 (ABNT 2014), que relacionam tal parâmetro com a resistência à tração e módulo de elasticidade. Nesse sentido, uma avaliação dos resultados de ensaios mecânicos realizados com BGTC poderiam indicar relações entre as propriedades mecânicas da mistura, a fim de apontar variáveis mecânicas que contribuíssem para a compreensão do comportamento do material e no desenvolvimento de um anteprojeto.

Desse modo, o presente artigo procura estabelecer relações entre resultados de ensaios de resistência realizados com carregamento na compressão e ensaios de rigidez e resistência na flexão para a BGTC, além de analisar a influência do tipo de cimento (CP II-F 32 e CPIV 32 RS), teor do ligante hidráulico (3% e 5%) e tempo de cura (7 e 28 dias) nas expressões obtidas.



PARÂMETROS MECÂNICOS

Resistência à Compressão Simples

A determinação da resistência à compressão consiste na aplicação de um carregamento crescente de compressão axial, sem tensão de confinamento, em corpos de prova cilíndricos, preferencialmente com altura de, pelo menos, duas vezes seu diâmetro (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Pesquisas já conduzidas sobre o tema indicam que a resistência à compressão da BGTC é influenciada por fatores como o teor de cimento, tipo de agregado e sua granulometria, energia e mecanismos de compactação, umidade da mistura e condição de cura (WU, 2011; YEO; JITSANGIAM; NIKRAZ, 2011; XUAN *et al.*, 2012; KLINSKY; FARIA, 2015; KLINSKY; BARDINI; FARIA, 2018; PRADO, 2018).

O cimento utilizado na BGTC desempenha um papel importante para melhorar a coesão da mistura e suas propriedades mecânicas. A resistência aumenta à medida que o teor de cimento aumenta, porque os produtos de hidratação preenchem os poros da matriz e aumentam a resistência da ligação entre as partículas (WU, 2011).

Resistência à tração

Segundo Yeo; Jitsangiam e Nikraz (2011), as reações de hidratação do cimento na BGTC formam uma matriz de intertravamento que liga os agregados e confere uma resistência à tração ao material, que por sua vez promove maior rigidez à flexão aos pavimentos, minimizando a deformação permanente.

A resistência à tração da brita graduada tratada com cimento é sempre considerada como um parâmetro significativo para o projeto de pavimentação, pois, enquanto camada da estrutura do pavimento, a fibra inferior do material sofre tensão de tração (XUAN *et al.*, 2012). Essa propriedade mecânica da BGTC é usualmente obtida por meio de ensaios de tração indireta e ensaios de tração na flexão, embora também seja possível sua obtenção por meio de ensaios de tração direta.

A obtenção da resistência à tração por meio do ensaio de tração indireta, ou tração por compressão diametral, consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um corpo de prova cilíndrico, que geram tensões de tração uniformes perpendiculares ao diâmetro solicitado.

Fatura e falha da camada de base de agregado estabilizado com cimento são causadas principalmente pela tensão de tração na flexão e deformação de tração produzida na fibra inferior da camada (MANDAL; EDIL; TIMJUM, 2017). A BGTC trabalhando em flexão será responsável pela absorção de tensões horizontais de tração, o que implica na necessidade de conhecer o nível máximo de sollicitação à tração, a fim de definir o carregamento máximo que leva à ruptura das ligações resultantes das reações de hidratação do cimento. No ensaio mais comumente realizado para determinar a resistência à tração na flexão, são utilizados corpos de prova prismáticos, nos quais são aplicadas duas cargas sobre os terços do vão de apoio da amostra.



DOI: [10.29327/1430212.49-44](https://doi.org/10.29327/1430212.49-44)

ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA TRAÇÃO
A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BGTC

Rigidez

A rigidez da brita graduada tratada com cimento pode ser investigada por meio de parâmetros como módulo de elasticidade, módulo dinâmico, módulo flexural e módulo de resiliência.

O conhecimento do módulo de elasticidade é fundamental na análise das deformações e trincamentos nas bases cimentadas, uma vez que as estruturas são projetadas de modo que não ultrapassem os valores de tensão e deformação correspondentes ao trecho linear do diagrama de deformação elástica (NASCIMENTO, 2017).

O módulo dinâmico da mistura cimentada pode ser obtido através de frequências ressonantes transversal, longitudinal e torcional de prismas e cilindros de concreto, através dos métodos de ressonância forçada e de impacto. El-Newihy (2013) explica que a vantagem de usar o módulo dinâmico para monitorar as propriedades de um material cimentado é que ele é sensível a mudanças dentro do compósito, como fissuras, adições minerais e porosidade, que fornecem propriedades cruciais para desempenho do material em serviço. Esse parâmetro de rigidez é especialmente relevante para análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura (ALMEIDA, 2005).

Como parâmetro de rigidez da BGTC tem-se, ainda, o módulo de resiliência e o módulo flexural. O módulo de resiliência do material representa sua resposta elástica resultante de uma carga aplicada em pulsos de curta duração (DNIT, 2018b). Quanto ao módulo flexural de misturas cimentadas, algumas interpretações sobre a intensidade do módulo flexural são abordadas por Mandal; Edil e Timjum (2017), os quais relatam que baixo módulo flexural em materiais estabilizados com cimento pode levar a altos níveis de tensão de tração na fibra inferior da camada de superfície e, conseqüentemente, trincamento por fadiga. Por outro lado, pavimentos com revestimento asfáltico e base muito rígida, módulo flexural elevado, estão sujeitos a fissuras de cima para baixo. Além disso, alto valor de módulo flexural em decorrência de elevado teor de ligante hidráulico, como o cimento, pode causar altas taxas de retração e grandes tensões de tração nesse material.

No presente artigo, a rigidez das misturas será analisada em função do módulo flexural, em consonância com o objetivo de relacionar ensaios de resistência com carregamento na compressão e os ensaios rigidez e resistência no carregamento na flexão, já que esse último tipo de carregamento se aproxima mais às condições em campo para materiais empregados em pavimentação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

As misturas de BGTC analisadas nessa pesquisa foram constituídas por agregados, cimento e água. Foram utilizados agregados de origem gnáissica, coletados em uma pedreira localizada no povoado Cajaíba, no município de Itabaiana, em Sergipe, além de areia fina, obtida no comércio local. Os agregados foram caracterizados com base na composição granulométrica (Figura 1), segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003), e os agregados graúdos quanto ao índice de forma, absorção e massa específica (Tabela 1), seguindo as especificações da NBR 7809 (ABNT, 2019) e DNER-ME 195 (DNIT, 1997), respectivamente.

Nas misturas, foram utilizados dois tipos de cimento: CP II-F 32, ou seja, cimento Portland composto com material carbonático e classe de resistência de 32 MPa, e o CP IV 32 RS, isto é, cimento Portland pozolânico resistente a sulfato, com classe de resistência de 32 MPa. O CP II-F-



32 possui em sua composição 75% a 89% de clínquer mais sulfatos de cálcio e 11% a 25% de material carbonático, enquanto o CP IV 32 RS possui 45% a 85% de clínquer mais sulfatos de cálcio, 15% a 50% de material pozzolânico e 0% a 10% de material carbonático (ABNT, 2018b).

A água potável usada estava livre de materiais orgânicos, óleos ou outras substâncias prejudiciais à hidratação do cimento.

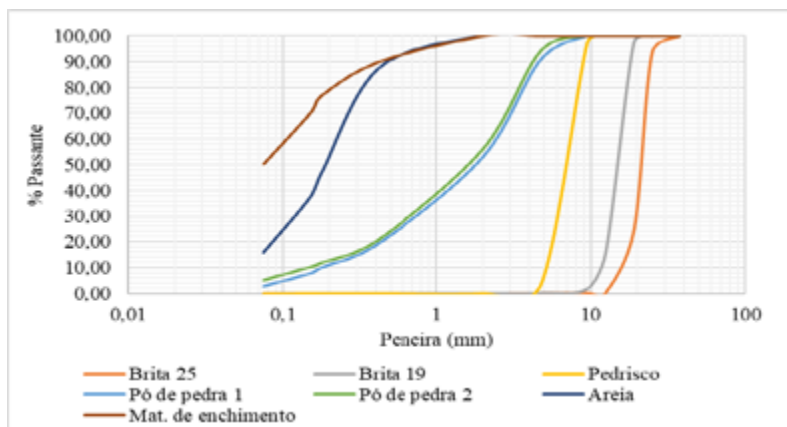


Figura 1. Curva granulométrica dos agregados

Tabela 1. Caracterização do agregado graúdo

Agregados	Absorção (%)	Massa específica seca (g/cm ³)	Índice de forma
Brita 25	0,26	2,697	2,01
Brita 19	0,29	2,700	2,28
Pedrisco	0,55	2,697	

Dosagem

A dosagem da BGTC consiste na determinação da composição granulométrica, teor de cimento e umidade da mistura.

Tendo em vista os resultados e conclusões apresentados por Prado (2018), empregou-se a faixa granulométrica estabelecida pelo Manual de Engenharia de Pavimentos da África do Sul (SAPEM, 2014), sendo, portanto, necessária a utilização de seis tipos de agregados, distribuídos da seguinte forma: 11,0% de brita 25; 15,0% de brita 19; 19,0% de pedrisco; 38,5% de pó de pedra; 12,5% de areia; e 4,0% de material de enchimento.

A curva granulométrica indica a proporção de cada agregado utilizado na mistura, porém, esse percentual foi ajustado em função do teor de cimento adicionado, ou seja, houve uma substituição em percentual de massa para inclusão do cimento, conforme Equação 1. Na pesquisa, foram utilizados dois teores de cimento, 3% e 5%, para cada tipo de cimento, totalizando, portanto, quatro dosagens (tratamentos) possíveis.

$$m\% = m^* \times (100\% - \text{cim}\%) \quad (1)$$

onde: m% = percentual em massa do agregado “m” na mistura com cimento (%);

m* = proporção em massa do agregado sem o cimento (decimal);

cim% = percentual de cimento que se deseja adicionar (%).



DOI: [10.29327/1430212.49-44](https://doi.org/10.29327/1430212.49-44)

ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA TRAÇÃO A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BGTC

Para determinar a umidade ótima das misturas, foi realizado o ensaio de compactação na energia Proctor modificada, conforme metodologia apresentada em DNIT 164-ME (DNIT, 2013), obtendo-se uma massa específica seca máxima de $2,417 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima igual a 5,2% para um teor de 3,0% de cimento. Já para 5,0% de cimento, foram encontradas massa específica seca máxima e umidade ótima correspondentes a $2,317 \text{ g/cm}^3$ e 5,8%, respectivamente.

As moldagens foram realizadas com mecanismos de compactação e em moldes específicos para cada ensaio. Concluída a moldagem, o conjunto (molde e material compactado) foi embalado em filme de policloreto de vinil (PVC), para conservar a umidade, e levado à câmara úmida com temperatura e umidade relativa do ar controladas em $30 \pm 2^\circ\text{C}$ e 85%, respectivamente, onde permaneceu por um período de 24 horas. Decorrido esse tempo, o corpo de prova foi desmoldado e novamente embalado em filme de PVC. Então, a amostra retornou à câmara úmida para conclusão do período de cura (sete ou vinte e oito dias), quando foram realizados os ensaios propostos.

Ensaio Mecânicos

As propriedades mecânicas foram avaliadas aos sete e vinte e oito dias de cura a partir do ensaio de resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RTCD), resistência à tração na flexão (RTF) e módulo flexural (MF). A Figura 2 ilustra os ensaios mecânicos realizados.

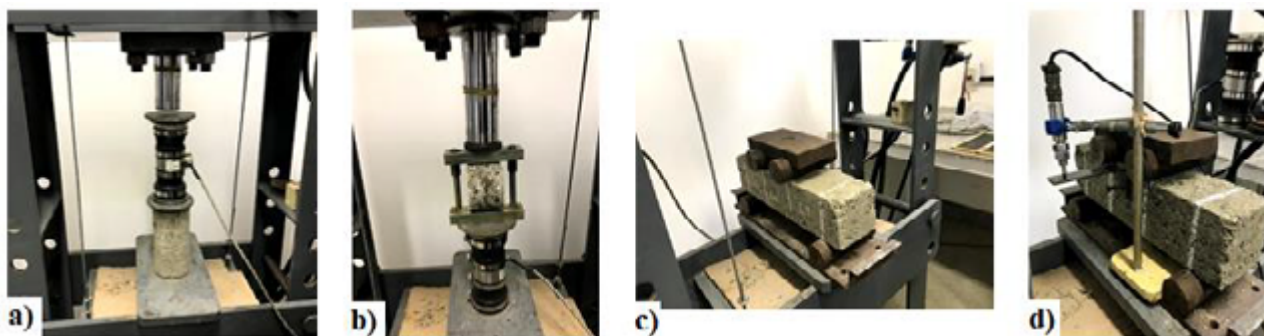


Figura 2. Configuração dos ensaios mecânicos: a) RCS; b) RTCD; c) RTF; d) MF

Utilizando a metodologia de moldagem da norma DNIT 181-ME (DNIT, 2018b), que apresenta as condições de compactação de misturas de BGTC em corpo de prova cilíndricos, foram moldados os corpos de prova para a determinação da resistência à compressão simples. Assim, foram compactados corpos de prova em cilindros com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, em 10 camadas iguais, com aplicação de 21 golpes por camada, através de um soquete com 4,53kgf, caindo a 45,70 cm, garantindo uma compactação mínima de 100%. O controle do grau de compactação foi realizado a partir da relação entre o peso específico aparente seco máximo da amostra compactada e o peso específico aparente seco máximo determinado no ensaio de compactação para o teor de cimento analisado.

Na determinação da resistência à tração por compressão diametral, os corpos de prova foram moldados em cilindros com 10 cm de diâmetro e 6 cm de altura, sendo aplicados 62 golpes em camada única, por meio de um soquete com massa de 4.540 g e altura de queda livre de 45,72 cm.

A resistência à tração na flexão e o módulo flexural foram determinados utilizando corpos de prova prismáticos, confeccionados em moldes com dimensões $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$. A compactação foi realizada por amassamento, prensagem estática, em três camadas com igual quantidade de material.



As camadas foram prensadas com uma força de compressão variável e crescente até que fosse atingida a altura pretendida para cada camada.

Confeccionados os corpos de prova, os ensaios foram realizados conforme normatizações a seguir:

- Determinação da resistência à compressão simples, determinada segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018a), com moldagem do corpo de prova conforme a norma DNIT 181-ME (DNIT, 2018b);
- Determinação da resistência à tração por compressão diametral, com os procedimentos apresentados pela norma DNIT 136-ME (DNIT, 2018a);
- Determinação da resistência à tração na flexão, utilizando os métodos de ensaios descritos em C78/78M (ASTM, 2021), AP-R462 (AUSTROADS, 2014), Report 789 (NCHRP, 2014) e NBR 12142 (ABNT, 2010);
- Determinação do módulo flexural, com base nos procedimentos descritos no Report 789 (NCHRP, 2014) e AP-R462 (AUSTROADS, 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para análise das correlações entre as propriedades mecânicas da BGTC foram utilizados os resultados de resistência e rigidez apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de rigidez e resistência de BGTC

Teor de cimento (%)	Idade (dias)	tipo de cimento	RCS (MPa)	RTCD (MPa)	RTF (MPa)	MF (MPa)
3	7	CP II-F 32	4,73	0,44	0,33	239,65
5	7	CP II-F 32	8,21	1,01	0,99	573,93
3	7	CP IV 32 RS	5,18	0,61	0,52	688,62
5	7	CP IV 32 RS	10,19	1,22	1,47	1428,66
3	28	CP II-F 32	4,63	0,68	0,77	358,06
5	28	CP II-F 32	8,36	1,40	1,51	756,29
3	28	CP IV 32 RS	7,92	0,96	1,13	687,66
5	28	CP IV 32 RS	13,22	2,08	2,31	1485,18

Com base na Tabela 2, percebe-se que a utilização do CP IV 32 RS nas misturas foi responsável pelo aumento de todos os parâmetros investigados, em comparação às misturas com CP-II F 32 com o mesmo teor de cimento e tempo de cura (idade). Constata-se também que maior teor de cimento e tempo de cura estão associados a maiores resistências e rigidezes. Assim, esses três fatores (tipo de cimento, teor do ligante hidráulico e idade) serão analisados nas relações estabelecidas entre as propriedades mecânicas.

A relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples é observada na Figura 3a, que apresenta todos os pares de RCS e RTCD obtidos. Dentre os fatores analisados, o tempo de cura foi o fator que demonstrou maior influência na relação, obtendo-se um fator de determinação (R^2) igual a 0,9806 para os resultados aos 7 dias de cura e 0,9348 para 28 dias (Figura 3b). Quanto mais próximo de 1 é o R^2 melhor é o ajuste dos dados ao modelo proposto.



DOI: 10.29327/1430212.49-44

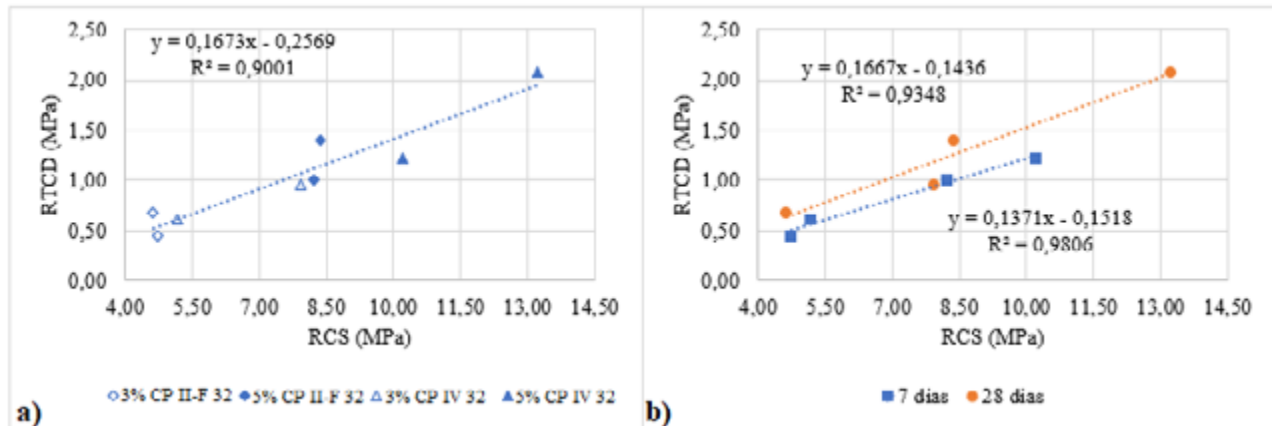
ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA TRAÇÃO
A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BGTC

Figura 3. a) Gráfico RCS x RTCD para todos os pares; b) Gráfico RCS x RTCD agrupados em função do tempo de cura
A Tabela 3 apresenta as expressões e R^2 encontrados na análise dos demais fatores.

Tabela 3. Relação entre RCS e RTCD

Fator do grupo	Expressão	R^2
3% de cimento	$RTCD = 0,1218 RCS - 0,0126$	0,7703
5% de cimento	$RTCD = 0,1753 RCS - 0,3253$	0,7773
CP II-F 32	$RTCD = 0,1794 RCS - 0,2814$	0,8094
CP IV 32 RS	$RTCD = 0,1792 RCS - 0,4194$	0,9464

A RCS também foi relacionada à RTF (Figura 4 e Tabela 4). Percebe-se que o tempo de cura também corresponde ao fator de maior influência na relação entre esses parâmetros mecânicos, com R^2 igual a 0,9878 para os ensaios aos 7 dias de cura e 0,9604 para 28 dias. Constatou-se, ainda, que para as misturas com cimento tipo CP IV 32 RS as relações lineares entre RCS x RTCD e RCS x RTF apresentam um bom ajuste com os resultados obtidos.

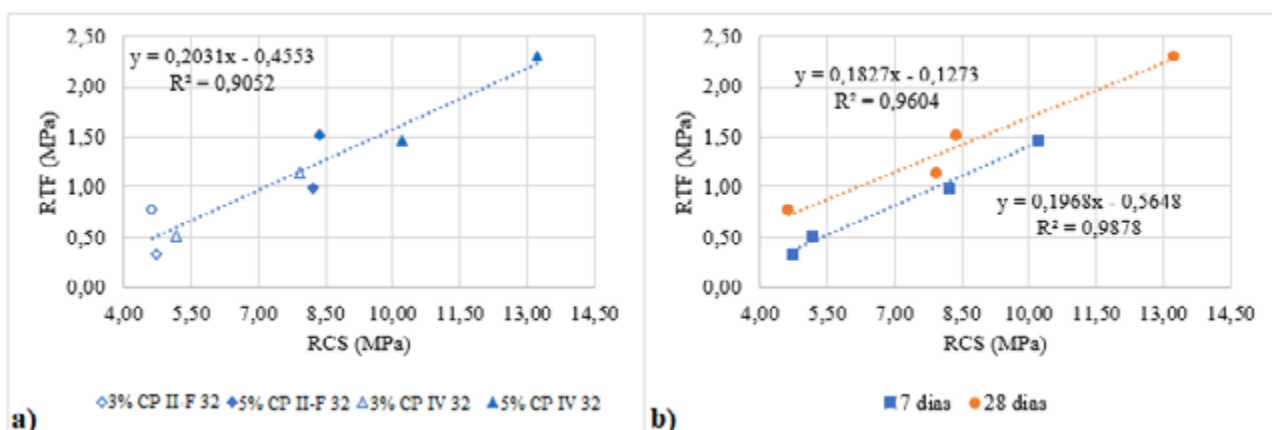


Figura 4. a) Gráfico RCS x RTF para todos os pares; b) Gráfico RCS x RTF agrupados em função do tempo de cura

Tabela 4. Relação entre RCS e RTF

Fator do grupo	Expressão	R^2
3% de cimento	$RTF = 0,1835 RCS - 0,3434$	0,6772
5% de cimento	$RTF = 0,2139 RCS - 0,5659$	0,8355
CP II-F 32	$RTF = 0,196 RCS - 0,3688$	0,6877
CP IV 32 RS	$RTF = 0,218 RCS - 0,6322$	0,9887



Foi investigada a relação entre a RTCD x RTF, obtendo-se bons ajustes para todos os fatores de influência avaliados nessa pesquisa, apesar do melhor ajuste ser obtido ao separar os resultados em função do tempo de cura, conforme pode ser visualizado na Tabela 5 e Figura 5.

Quando comparado ao ensaio de resistência à tração na flexão, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral demanda menos tempo e material, consequentemente é um ensaio de menor custo e mais prático à rotina de obras. São necessários 471,24 cm³ e 4000,00 cm³ da mistura de BGTC, para os ensaios de RTCD e RTF, respectivamente, além do método de compactação do CP prismático demandar um aparato mais sofisticado. Desse modo, o bom ajuste das expressões encontradas com os resultados experimentais para todos os fatores analisados indica a possibilidade de utilização do ensaio de RTCD na compreensão da capacidade resistiva à tração da BGTC.

Tabela 5. Relação entre RTCD e RTF

Fator do grupo	Expressão	R ²
7 dias de cura	$RTF = 1,4124 RTCD - 0,3287$	0,9763
28 dias de cura	$RTF = 1,0792 RTCD + 0,0512$	0,9965
3% de cimento	$RTF = 1,5858 RTCD - 0,3771$	0,9734
5% de cimento	$RTF = 1,1574 RTCD - 0,0787$	0,9665
CP II-F 32	$RTF = 1,1708 RTCD - 0,1306$	0,9761
CP IV 32 RS	$RTF = 1,177 RTCD - 0,0735$	0,9775

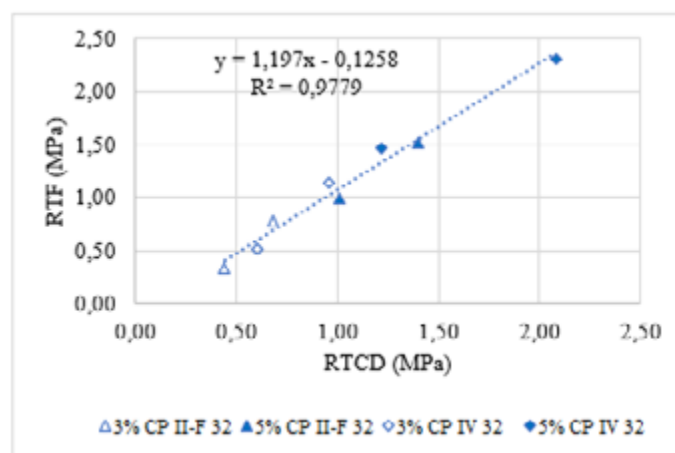


Figura 5. Gráfico RTCD x RTF para todos os pares obtidos

Também foram verificadas as relações existentes entre parâmetros de resistência e rigidez, através dos pares RCS x MF e RTCD x MF. Para a expressão obtida a partir dos pares RCS x MF foi encontrado um coeficiente de determinação igual a 0,806, com o melhor ajuste para os pares agrupados conforme o tempo de cura (Figura 6 e Tabela 6). Já para os pares RTCD x MF, percebe-se que o tipo de cimento apresentou grande influência na relação, sendo os resultados das misturas com cimento tipo CP II-F 32 os mais ajustados à expressão determinada pela tendência dos dados, embora o tempo de cura continue sendo um fator relevante, como observado na Figura 7 e Tabela 7.



DOI: 10.29327/1430212.49-44

ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA TRAÇÃO
A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BGTC

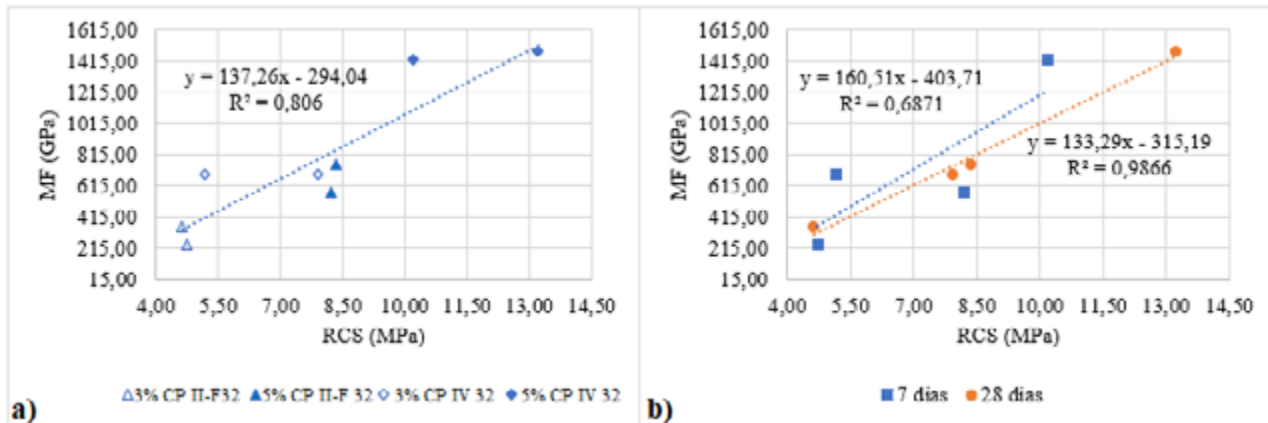


Figura 6. a) Gráfico RCS x MF para todos os pares; b) Gráfico RCS x MF agrupados em função do tempo de cura

Tabela 6. Relação entre RCS e MF

Fator do grupo	Expressão	R ²
3% de cimento	MF = 99,516 RCS – 65,158	0,4518
5% de cimento	MF = 172,3 RCS – 661,32	0,7499
CP II-F 32	MF = 102,01 RCS – 179,28	0,8580
CP IV 32 RS	MF = 115,94 RCS + 14,285	0,7926

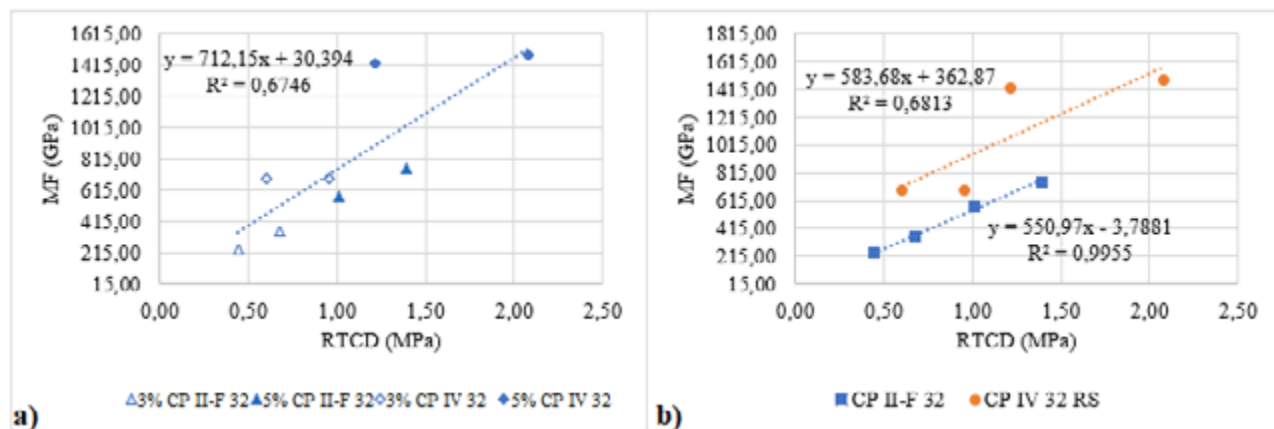


Figura 7. a) Gráfico RTCD x MF para todos os pares; b) Gráfico RTCD x MF agrupados em função do tipo de cimento

Tabela 7. Relação entre RTCD e MF

Fator do grupo	Expressão	R ²
3% de cimento	MF = 720,86 RTCD + 9,9216	0,4562
5% de cimento	MF = 641,6 RTCD + 145,66	0,4109
7 dias de cura	MF = 1152,8 RTCD – 211,6	0,798
28 dias de cura	MF = 755,43 RTCD – 143,89	0,942

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios aqui realizados em misturas de brita graduada tratada com cimento e as relações propostas a partir de parâmetros mecânicos, obtidos com carregamentos na compressão, indicaram a possibilidade de utilização de expressões para a estimativa de comportamento mecânico resultante de carregamento na flexão. Entretanto, cabe destacar que melhores ajustes para as relações



propostas foram obtidos quando se agrupou os resultados em função de um dado fator (tempo de cura, tipo de cimento Portland ou teor do ligante hidráulico). Para as relações entre as resistências obtidas em carregamentos na compressão e na flexão o fator tempo de cura resultou em expressões com maiores coeficientes de determinação.

Em se tratando da relação entre resistência à tração por compressão diametral e módulo flexural, parâmetros de resistência e rigidez, respectivamente, o tipo de cimento se configurou no fator mais relevante na estimativa. Por outro lado, a relação entre resistência a compressão simples e módulo flexural apresenta melhor ajuste para o tempo de cura.

Destaca-se o ótimo ajuste na curva de estimativa da resistência à tração na flexão a partir da resistência à tração por compressão diametral em molde do tipo Marshall. Portanto, seria possível determinar a RTF em função da RTCD, sendo esse último um ensaio que demanda menos tempo de execução, menor quantidade de material e menor complexidade de execução quando comparado ao primeiro.

Espera-se com o desenvolvimento dessa pesquisa despertar estudos sobre as relações entre as propriedades mecânicas da BGTC, a fim de prever o comportamento deste material sob carregamento na flexão (mais próximo às condições de campo) a partir de ensaios de simples execução e viabilizar as atividades de anteprojetos antes da conclusão de todo plano experimental em obras rodoviárias. A intenção dos autores não é substituir os ensaios mais demorados e complexos por ensaios mais simples, mas sim apresentar alternativas para a elaboração de anteprojetos que se aproximem mais do projeto executivo.

Ressalta-se a importância da ampliação de um banco de dados com resultados de ensaios mecânicos em BGTC, a fim de confirmar as relações estabelecidas nessa pesquisa, analisar outros fatores de influência nas relações e obter melhores ajustes nas equações de estimativas propostas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LTT/UFS (Laboratório de Topografia e Transportes da Universidade Federal de Sergipe) pela infraestrutura e apoio técnico que possibilitaram a realização dos ensaios e à pedra Rio das Pedras pelo fornecimento dos agregados desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11803: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: Concreto – Determinação de resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018b.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.



DOI: [10.29327/1430212.49-44](https://doi.org/10.29327/1430212.49-44)

ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA TRACÇÃO
A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BGTC

- ALBUQUERQUE, F. S.; DE MENDONÇA, A. T. Análise crítica e ajuste de modelos de previsão de fadiga com análise incremental de danos para BGTC executada em pavimento asfáltico semirrígido. TRANSPORTES, ISSN: 2237-1346, DOI: 10.14295/transportes.v25i2.1046, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 101–117, 2017.
- ALMEIDA, S. Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura. Escola de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas).
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C78/C78M. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). Estados Unidos, 2021.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C215. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. Estados Unidos, 2020.
- AUSTROADS. AP-R462: Cemented Materials Characterization. Sydney, 2014.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. PETROBRAS: ABEDA. Rio de Janeiro: 2006. 504 p.
- DER/SP. DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. ES-P 16/18: Pavimentação: brita graduada tratada com cimento. Paraná, 2018.
- DER/PR. DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. ET-DE-P00/009: Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento – BGTC. São Paulo, 2005.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNIT 164-ME: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNER-ME 195: Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNIT 136-ME: Pavimentação asfáltica – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018a
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNIT 181/2018-ME: Pavimentação – Material estabilizado quimicamente - determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018b.
- EL-NEWIHY, A. Application of impact resonance Method for evaluation of the dynamic elastic properties of polypropylene fiber reinforced concrete. American University in Cairo, 2013. Thesis (Master of applied Science).
- KLINSKY, L. M. G.; BARDINI, V. S. S.; FARIA, V. C. Comparativo entre as compactações proctor e vibratória na brita graduada tratada com cimento. In: 32º Congresso de pesquisa e ensino em transporte da ANPET, Gramado. Anais [...] Brasil, 2018. p. 2088-2097.
- KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V. C. Estudo da influência do teor de cimento Portland, da energia de compactação e da umidade no comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados. 2015. Relatório elaborado para a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) – Centro de pesquisas rodoviárias (CPR), Concessionária CCR Nova Dutra, Grupo CCR, 2015.
- MANDAL, T.; EDIL, T. B.; TIMJUM, J. M. Study on flexural strength, modulus, and fatigue cracking of cementitiously stabilized materials. Road materials and pavement design. ISSN: 1468-0629. DOI: 10.1080/14680629.2017.1325772. 2017.
- NASCIMENTO, R. S. Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).
- NCHRP. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. Report 789. Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis. Washington, 2014.
- PRADO, K. Estudo de Critérios de dosagem para melhoria de desempenho mecânico de brita graduada tratada com cimento. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).
- SAPEM. South African Pavement Engineering Manual. South African National Roads Agency Soc Ltd. 2014. 2ª edição.
- WU, P. Cement-bound road base materials. Report 7-11-218-1. PowerCem Technologies. Delft University of Technology. Julho, 2011.
- XUAN, D. X.; HOUBEN, L. J. M.; MOLENAAR, A. A. A.; SHUI, Z. H. Mechanical properties of Cement-Treated aggregate material – A review. Materials and Design. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.04.055. vol. 33. 2012. p. 496-502.
- YEO, Y. S.; JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. Mix design of cementitious basecourse. In: International Conference on Advances in Geotechnical Engineering. ISBN: 978-0-646-55142-5. Perth, Australia. Anais [...] Australia, 2011. p. 379-385.



AVALIAÇÃO MECÂNICA DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO CONTENDO FIBRA DE POLIPROPILENO MULTIFILAMENTO

Helen Mariana Ribeiro Fontes¹; Fernando Silva Albuquerque¹

RESUMO

Com o aumento das cargas de tráfego nas rodovias o potencial de danos à estrutura dos pavimentos também aumentou ao longo do tempo. Nos anos 1970 a brita graduada tratada com cimento (BGTC) passou a ser muito aplicada em vias de grande volume de tráfego pesado. A BGTC promove ao pavimento alta rigidez, controlando as deformações permanentes, porém é um material susceptível à fadiga, gerando trincamentos excessivos, reflexão de trincas às camadas asfálticas, causando a degradação completa ao pavimento. Consequentemente, mesmo sendo mais resistente, devido a adição do cimento, que materiais granulares, ainda pode conferir durabilidade menor que a desejada ao pavimento, o que gera mais gastos e transtornos para a malha rodoviária e usuários. Com isso, essa pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho mecânico de uma BGTC+fibras de polipropileno multifilamento para uso em pavimentos semirrígidos, comparando seu desempenho ao de uma BGTC tradicional com 4% de cimento Portland (CP-IV). A interação da BGTC+fibras resultou em um material de menor rigidez, sem perda de resistência à tração da matriz cimentada, mas com tenacidade ampliada, além de elevada resistência à fadiga, quando comparada à BGTC tradicional. O compósito estudado de BGTC+fibras configura-se como um material de grande potencial para uso em pavimentação de alto volume de tráfego, devido ao seu elevado desempenho, mesmo a um baixo custo de implementação.

PALAVRAS-CHAVE: brita graduada tratada com cimento, fibras, camadas cimentadas, pavimento de alto desempenho

ABSTRACT

With the increase in traffic loads on highways, the potential for damage to pavement structures has also increased over time. In the 1970s, cement-treated stones became widely applied in high-volume heavy traffic roads. Cement-treated stones provide high pavement stiffness, controlling permanent deformations, but it is susceptible to fatigue, leading to excessive cracking, crack reflection to asphalt layers, causing complete pavement degradation. Consequently, even though it is more resistant than granular materials, it may still provide less durability than desired to the pavement, leading to increased expenses and disruptions for the road network and users. Therefore, this research aimed to evaluate the mechanical performance of cement-treated stones with multifilament polypropylene fibers for use in semi-rigid pavements, comparing its performance to that of traditional cement-treated stones with 4% Portland cement (Type IV). The interaction of CTGG with fibers resulted in a material with lower stiffness, without loss of tensile strength of the cementitious matrix, but with increased toughness and high fatigue resistance compared to traditional cement-treated stones. The studied composite of cement-treated stones with fibers represents a material with great potential for use in high-traffic volume pavement due to its high performance, even at a low implementation cost.

KEY WORDS: Cement-treated graded aggregate; Fibers; Cement-treated layers; High-performance pavement

¹ Universidade Federal de Sergipe, Laboratório de Topografia e Transportes (LTT), marianafontes0103@academico.ufs.br; albuquerque.f.s@academico.ufs.br



DOI: [10.29327/1430212.49-34](https://doi.org/10.29327/1430212.49-34)

AVALIAÇÃO MECÂNICA DA BRITA GRADUADA TRATADA COM
CIMENTO CONTENDO FIBRA DE POLIPROPILENO MULTIFILAMENTO

INTRODUÇÃO

A sustentabilidade na construção é de extrema importância, pois são gerados diariamente toneladas de resíduos oriundos de obras de pavimentação, que em sua grande maioria, são descartados de forma indevida no meio ambiente. No Brasil, os pavimentos dimensionados possuem uma vida útil bem curta devido às restrições econômicas e com isso geram-se mais manutenções em curto ou médio prazo, o que representa um custo maior em longo prazo para manter a malha rodoviária, além de mais produção de resíduos e uso de recursos.

A degradação dos pavimentos é causada em parte pelas condições ambientais, mas em maior escala devido alta frequência de carregamento nas vias e ao excesso de suas cargas. De acordo com Medina e Motta (2005), esse excesso de carga resulta no desgaste acelerado dos pavimentos, podendo causar o trincamento por fadiga, que nada mais é que o dano causado pela repetição de cargas do tráfego, ou por deformações plásticas, causado pelo cisalhamento nas camadas. Desse modo, torna-se necessária a construção de um pavimento com vida útil maior, de forma a ser mais econômico em longo prazo.

Segundo Bernucci et al. (2022), as estruturas de pavimentos brasileiros são geralmente dimensionadas para uma vida útil muito curta por conta de restrições econômicas de médio prazo, embora no longo prazo isso signifique um maior custo para as organizações que gerenciam malhas rodoviárias. Os pavimentos asfálticos são comumente projetados para uma vida de serviço de 10 anos, enquanto que os pavimentos de concreto (com alto consumo de cimento Portland) são a opção para uma vida de serviço mais prolongada (até 25 anos).

Por outro lado, alguns materiais bem conhecidos na engenharia rodoviária podem cumprir a função da camada de sub-base ou base de alto desempenho, geralmente cimentadas, para constituir uma pavimentação asfáltica semirrígida. A Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) pode ser uma alternativa mais econômica para isso, já que seu consumo de cimento é um dos menores entre as camadas cimentadas, insumo esse considerado o mais relevante nesses materiais.

Segundo Bernucci et al. (2008), a BGTC é constituída de granulometria muito semelhante à Brita Graduada Simples, mas com a adição de cimento. Em meados da década de 1970, passou a ser muito aplicada para via com alto volume de tráfego no Estado de São Paulo. Os mesmos autores mencionam que a grande limitação da BGTC é sua ruptura quase frágil, ou seja, com baixíssimas deformações.

Essa deficiência foi estudada por Bacelar (2019), que desenvolveu um compósito pela mistura da BGTC com fibras. Com isso, foi estudado nesta pesquisa o uso de BGTC com fibras para atingir uma vida útil de serviço elevada, capaz de resistir ao alto volume de tráfego pela ampliação da vida de fadiga.

Nessa ótica, o presente estudo analisou o desempenho de uma BGTC com a adição de fibras de polipropileno para uso como camada de pavimentos semirrígidos. O intuito foi avaliar os ganhos ao desempenho mecânico pelo uso desse compósito frente a uma BGTC tradicional.

A partir dos resultados observou-se que, pelo fato de ter desempenho mecânico superior, o compósito BGTC+fibras apresenta uma relação benefício/custo melhor em longo prazo. A redução do consumo de recursos naturais e da geração de passivos ambientais pela menor frequência de atividades de manutenção pode ser outro benefício.



MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais estudados

Em consonância com Bernucci et al. (2008), na BGTC é utilizado o mesmo material da BGS, entretanto com acréscimo de cimento, que varia entre 3 a 5% em relação a massa total, respeitando as recomendações da ABNT NBR 12261 (1991d), ABNT NBR 12262 (1991e) e DER-SP ET-DE-P00/009/2005.

De acordo com a mesma referência, para o aumento da resistência e durabilidade da BGTC é necessário que a compactação seja realizada na energia modificada. É importante destacar que o uso do cimento inadequado ou em grande quantidade provoca a retração importante devido à cura, consequentemente há o surgimento de trincas e fissuras. É preciso cuidado ao empregar a BGTC como camada de base, pois, após trincamento dessa, pode haver reflexão de trincas para a camada asfáltica.

Nessa pesquisa, com o propósito que diminuir os efeitos da retração, optou-se por dosar a mistura com granulometria do *South African Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014), que tem maior quantidade de materiais passantes na #4 e é de alta densidade. A porcentagem de cimento escolhida foi de 4%, cujo consumo de cimento é relativamente baixo, mas intermediário de acordo com as recomendações normativas.

De acordo com a ABCP (2002), o Cimento Portland resistente à sulfatos possui baixo calor de hidratação, o que reduz a probabilidade de retração. Possui também boa interação com agregados reativos e boa resistência à agentes químicos. O cimento CP IV 32- RS possui em sua composição de 15 a 30% de pozolana. Com isso, o alto teor de pozolana reduz a reatividade dos agregados em ambientes que tem a presença de sulfatos. Em princípio, uso desse cimento atinge menor resistência que cimentos comuns nos primeiros dias, o que ajuda também a reduzir os efeitos da retração (ABCP, 2002). Este tipo de cimento atende a NBR 16697.

A inserção da fibra na mistura de BGTC teve o objetivo de melhorar o desempenho do material na tração, pois, devido a BGTC convencional ser um material de comportamento quase-frágil, pode trincar facilmente. Devido a isso, a fibra aumenta a tenacidade (ou seja, o quanto o material vai absorver energia antes de fraturar) e a resistência à fadiga. A fibra utilizada nesta pesquisa foi a de polipropileno multifilamento (BACELAR, 2019).

De acordo com Bacelar (2019), a vantagem deste tipo de fibra é o bom entrosamento com os agregados e cimento e o elevado número de filamentos por kg, conforme a Figura 1.

Como pode ser visto na Figura 1, para ser utilizada na mistura é preciso separar os filamentos de fibras, que são fornecidas entrelaçadas, para a obtenção de uma mistura mais homogênea.

De acordo com Bacellar (2019), a fibra possui 54 mm e tem formato em multifilamento. É um tipo de fibra sintética e é composta por mescla de poliolefinas. Essa característica química promove bom desempenho com agregados e cimento. A fibra utilizada possui outras características que são: a) Módulo de elasticidade: 7GPa; b) Resistência à tração: 550-650 MPa; c) Densidade (g/cm³): 0,91; d) Resistência à álcalis: total; e) Condutividade elétrica: nula; f) Absorção: nula; e g) Ancoragem: físico/química.

Os materiais pétreos utilizados nesta pesquisa foram coletados na usina de asfalto da Empresa Municipal de Obras e Urbanização (EMURB), localizada em São Cristóvão/SE. Foi utilizada brita



DOI: 10.29327/1430212.49-34

AVALIAÇÃO MECÂNICA DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO CONTENDO FIBRA DE POLIPROPILENO MULTIFILAMENTO

1, brita 3/8, fileres da pedra britada, areia e pó de pedra. Observa-se na Figura 2a a distribuição dos materiais na curva granulométrica do SAPEM (2014).



Figura 1. Fibra de Polipropileno Multifilamento

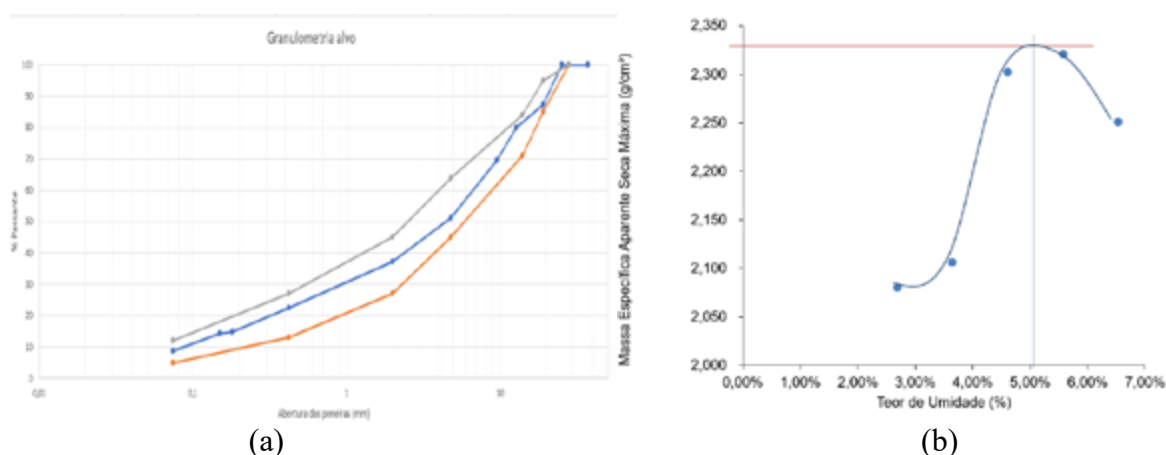


Figura 2. (a) Curva Granulométrica utilizada para a BGTC; (b) Curva de Compactação

O cimento utilizado foi coletado por meio de doação na Usina de cimento da Votorantim, localizada no município de Laranjeiras/SE. O teor utilizado, conforme já mencionado, foi 4%, dentro da faixa recomendada para BGTCs.

A água utilizada nas misturas foi da própria rede. A umidade ótima foi obtida através do ensaio de compactação referenciado pelo DNER-ME 162/64, na energia Proctor modificada, com 55 golpes por camada e amostra total de 7kg. A umidade ótima (W_o) foi obtida conforme Prado (2018), de acordo com a água adicionada à mistura.

$$M_{seca} = \frac{100}{100 + W_o} * M_{total}$$

Diante disso, pôde-se observar na curva de compactação da Figura 2b que o teor de umidade ótima da BGTC com 4% de cimento foi 5,2% e massa específica aparente seca máxima de 2,33 g/cm³.



Determinação do teor de fibras

Apresenta-se na Figura 3 o desempenho das fibras na avaliação da resistência à tração e tenacidade, conforme definido por Bacelar (2019) e Bacelar et al. (2020).

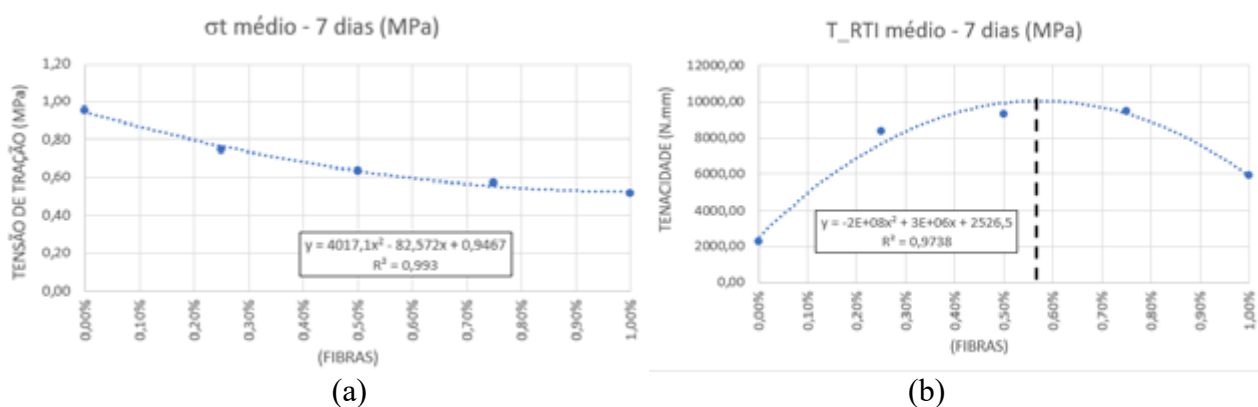


Figura 3. (a) RTCD pela porcentagem de fibras; (b) tenacidade pela porcentagem de fibras

Mesmo que a resistência à tração (Figura 3a) seja um bom indicador de desempenho para a mistura cimentada, o parâmetro levado em consideração para a dosagem das fibras foi a tenacidade (Figura 3b), pois é a que reúne o melhor desempenho à deformabilidade e ancoragem às fibras. Essa avaliação tem o propósito de indicar qual das misturas oferece maior capacidade de deformação até atingir 40% da tensão de ruptura à tração, conforme Bacellar (2019), ou seja, indica o material compósito que melhor converteu o comportamento quase-frágil para tenaz. Com isso, a mistura que apresentou o melhor desempenho à tenacidade foi com aproximadamente 0,5% de fibras em volume na mistura.

Ensaio mecânicos para avaliação da BGTC+fibras

Foram realizados ensaios mecânicos a fim de se determinar parâmetros como a Resistência à Compressão Simples (RCS), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) e na Flexão (RTF), Módulo de Resiliência (MR), Módulo Dinâmico (E^*) e Vida Fadiga.

Para o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) foi utilizado o procedimento da norma DNIT 136/2018-ME (Figura 4a). Este ensaio foi realizado em corpos de prova (CPs) com e sem o acréscimo de fibras e ensaiados com 7 e 28 dias de cura.

Para o ensaio de Resistência à tração na flexão (RTf) foi utilizado o procedimento da norma NBR 12142 (Figura 4b). Este ensaio foi realizado com e sem o acréscimo de fibras e apenas para 28 dias de cura.

Para o ensaio de Resistência à compressão simples (RCS) foi utilizado o procedimento da norma DNER-ME 201/94 (Figura 4c). Este ensaio foi realizado com e sem o acréscimo de fibras e CPs com 28 dias de cura.



DOI: [10.29327/1430212.49-34](https://doi.org/10.29327/1430212.49-34)

AVALIAÇÃO MECÂNICA DA BRITA GRADUADA TRATADA COM
CIMENTO CONTENDO FIBRA DE POLIPROPILENO MULTIFILAMENTO

Para o ensaio de Módulo de resiliência (MR) foi utilizado o procedimento da norma DNIT 181/2018-ME (Figura 4d). Este ensaio foi realizado com e sem o acréscimo de fibras e CPs com 28 dias de cura.

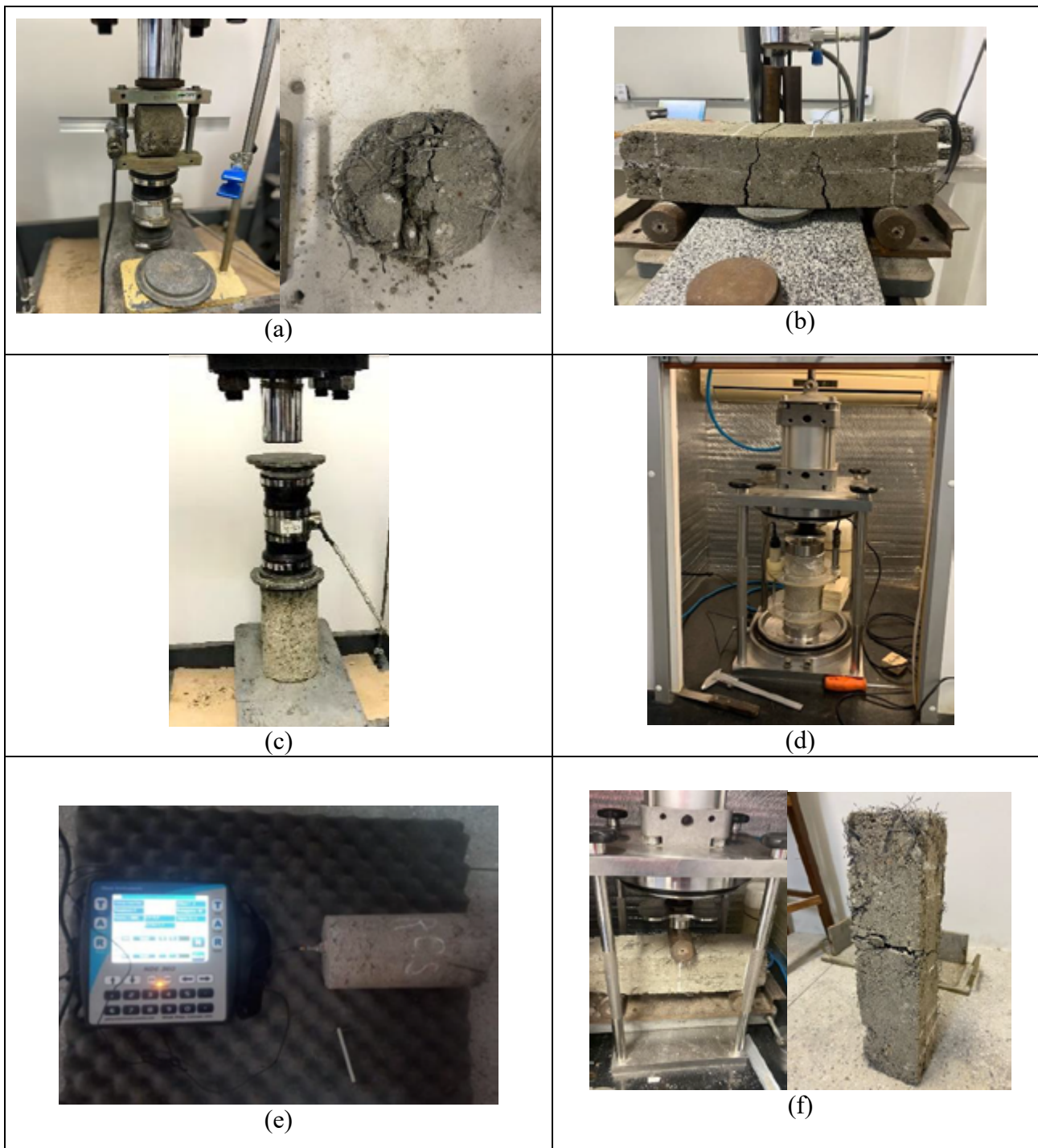


Figura 4. Imagens dos ensaios realizados na pesquisa:
(a) RTCD; (b) RTf; (c) RCS; (d) MR; (e) E*; (f) Fadiga.



Para o ensaio de Módulo dinâmico longitudinal (E^*) foi utilizado o procedimento da ASTM C215/2014 (Figura 4e). Este ensaio foi realizado com e sem o acréscimo de fibras e CPs com 28 dias de cura.

E para o ensaio de Vida de Fadiga foi utilizado o procedimento da AUSTROADS (2004) para materiais cimentados (Figura 4f). Este ensaio foi realizado com e sem o acréscimo de fibras e CPs prismáticos com 28 dias de cura. O armazenamento dos CPs nos processos de cura foi comum a todas as geometrias, sempre com o material envolto a plástico filme e depositado em câmara úmida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As discussões foram feitas analisando o impacto da inserção da fibra na BGTC para cada ensaio realizado. Dessa forma, o objetivo foi avaliar o comportamento da inserção da fibra no que diz respeito ao desempenho mecânico adquirido pelo compósito em comparação com a BGTC tradicional.

Os resultados obtidos para RTCD estão apresentados graficamente na Figura 5 para melhor entendimento. Para isso, foram ensaiados três corpos de prova controle (sem fibra) e outros três com fibra para obter uma média da tensão de tração e poder fazer um comparativo do resultado.

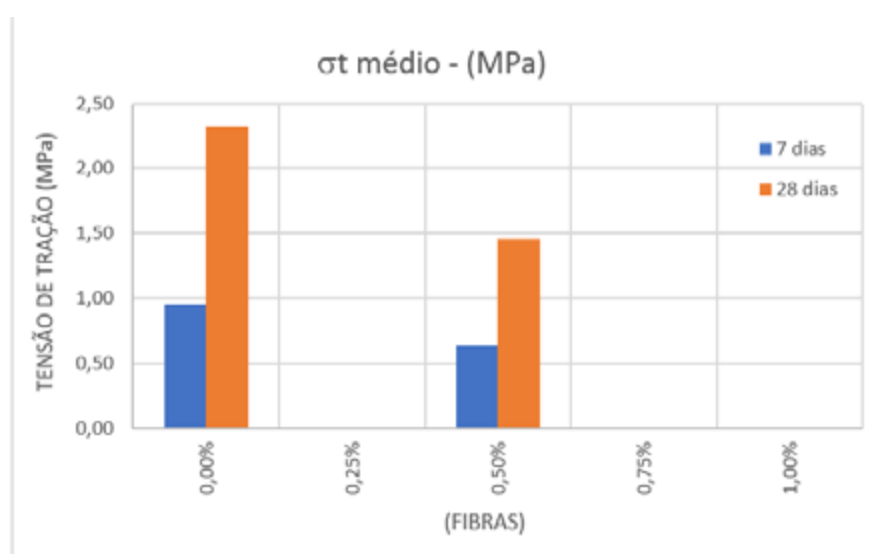


Figura 5. Comparativo do desempenho do RTCD com 7 dias e com 28 dias

A partir da Figura 5, nota-se um aumento esperado nos valores médios de RTCD tanto para mistura padrão quanto para mistura com fibra dos 7 dias para 28 dias de cura. Entretanto, o aumento foi maior para a mistura padrão. Essa variação, já conhecida pelo grupo de pesquisa, ocorreu devido ao procedimento de moldagem e ensaio, pois como os corpos de prova são pequenos não teve uma homogeneização adequada das fibras à matriz da mistura. Apesar disso, quando comparado os resultados obtidos com os de Bacellar (2019), nota-se que são satisfatórios, pois superaram as

DOI: [10.29327/1430212.49-34](https://doi.org/10.29327/1430212.49-34)

AVALIAÇÃO MECÂNICA DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO CONTENDO FIBRA DE POLIPROPILENO MULTIFILAMENTO

misturas por ele realizadas com 5% de cimento, muito devido ao aprimoramento da faixa granulométrica (SAPEM, 2014) e tipo de cimento (CP-IV) adotados pelo grupo de pesquisa. Os resultados obtidos para RCS estão apresentados na Figura 6 de forma gráfica para melhor visualização. Foram ensaiados três corpos de prova controle (sem fibra) e três com fibra para obter uma média da tensão de compressão máxima e poder fazer um comparativo dos resultados.

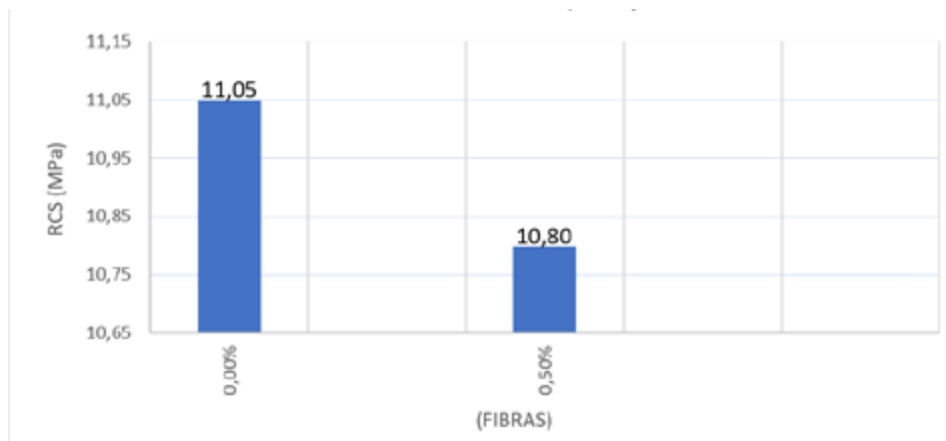


Figura 6. Desempenho do RCS com 28 dias

De acordo com o gráfico da Figura 6, o maior resultado de RCS foi para a mistura padrão, o que reflete a possibilidade de uma menor rigidez da mistura com fibras. Esse resultado, pelo fato de que ambos atingiram RCS acima da mínima, é desejável, já que um material menos rígido tende a apresentar menos retração e tensões internas pela atuação do tráfego.

Quando comparando os resultados obtidos com os de Bacelar (2019), nota-se comportamento semelhante ao obtido por ele, com decréscimo da RCS com uso de fibra de polipropileno.

Os resultados obtidos no MR estão apresentados na Figura 7. Também foram ensaiados três corpos de prova controle (sem fibra) e três com fibra seguindo a norma do DNIT 181/2018-ME, para obter uma análise de rigidez das misturas.

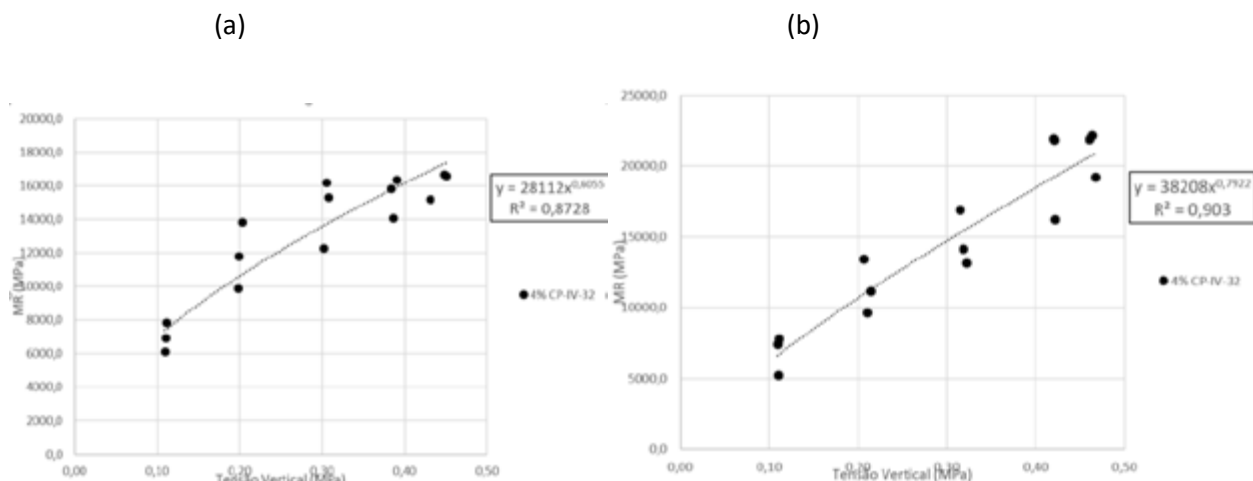


Figura 7. MR de misturas: (a) sem fibra (b) com fibra



Fazendo um comparativo das Figura 7a e 7b, nota-se um aumento no valor do MR com a adição de fibra em relação a mistura controle. Esse aumento ocorreu devido aos CPs com fibra terem sido ensaiados com idade maior (3 dias) que as misturas de controle. Além disso, os CPs com fibra ficaram três dias fora do processo de cura com plástico filme (de forma não programada), o que ocasionou uma secagem acentuada da mistura, provocando o enrijecimento adicional. Esse comportamento não se repetiu na análise do módulo dinâmico apresentado na sequência, já que ambos foram ensaiados em uma mesma idade e nas mesmas condições de cura.

Os resultados obtidos no módulo dinâmico torcional estão apresentados na Figura 8 de forma gráfica. Foram ensaiados três corpos de prova controle (sem fibra) e outros três com fibra para obter uma média do E^* e poder fazer um comparativo dos resultados.

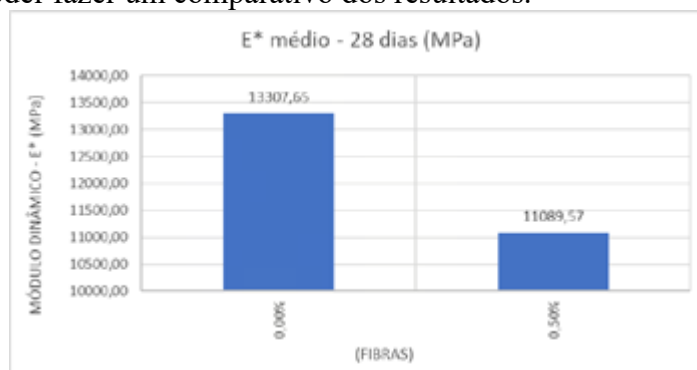


Figura 8. Desempenho do E^* torcional para mistura padrão e com fibra

É possível visualizar nos resultados que a mistura sem fibras é mais rígida que com fibras, porém ambas com rigidez elevada e apropriada para uso em camadas de alta resistência à deformação permanente, o qual é o foco das camadas cimentadas. Como ambas as misturas foram ensaiadas na mesma idade e nas mesmas condições de cura, observa-se, conforme esperado, que a mistura com fibras é menos rígida que a sem fibras. Isso é um bom indicador para redução de problemas de retração e maior resiliência aos carregamentos, conforme já indicado nos ensaios de RCS.

O ensaio foi feito pela avaliação da frequência natural que transita pelo corpo de prova, através de tensões bem pequenas e sem deformações. Portanto, a flexibilidade das fibras em conjunto com a matriz cimentada é identificada pela mudança ocorrida na frequência natural captada no ensaio.

Os ensaios de RTf foram realizados combinando a leitura de deformação das vigas prismáticas após a ruptura dos CPs por tração, avaliando assim a tenacidade da mistura, obtida pela área formada no gráfico de força aplicada no ensaio de RTf versus deslocamento no topo do CP, até atingir 40% da força de ruptura da matriz cimentada. Os resultados obtidos na RTf estão apresentados na Figura 9a. Três corpos de prova controle (sem fibra) e três com fibra foram ensaiados para obter uma média das tensões de tração de ruptura na flexão.



DOI: 10.29327/1430212.49-34

AVALIAÇÃO MECÂNICA DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO CONTENDO FIBRA DE POLIPROPILENO MULTIFILAMENTO

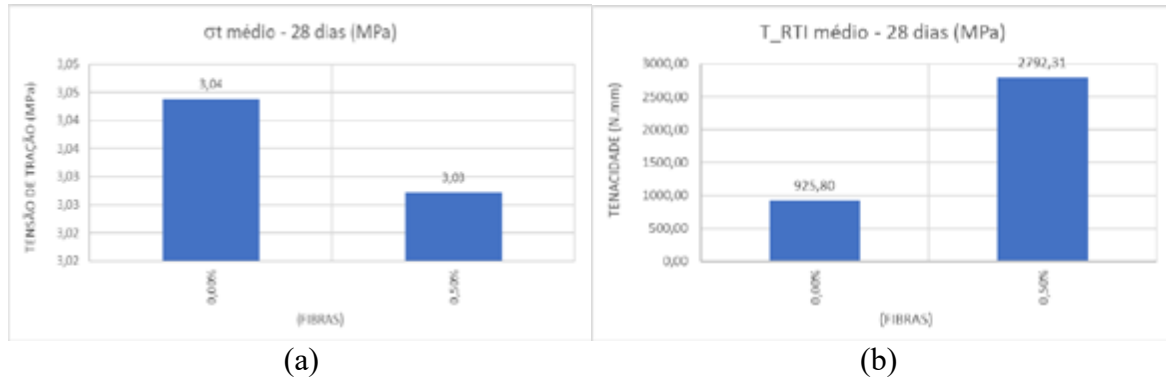
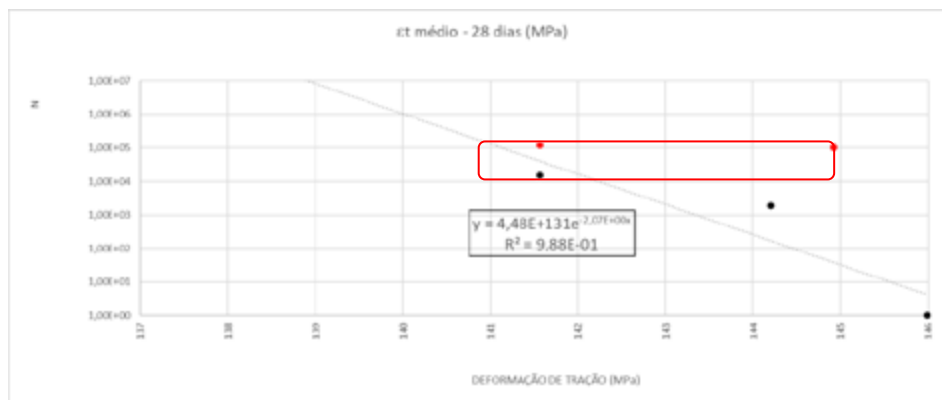


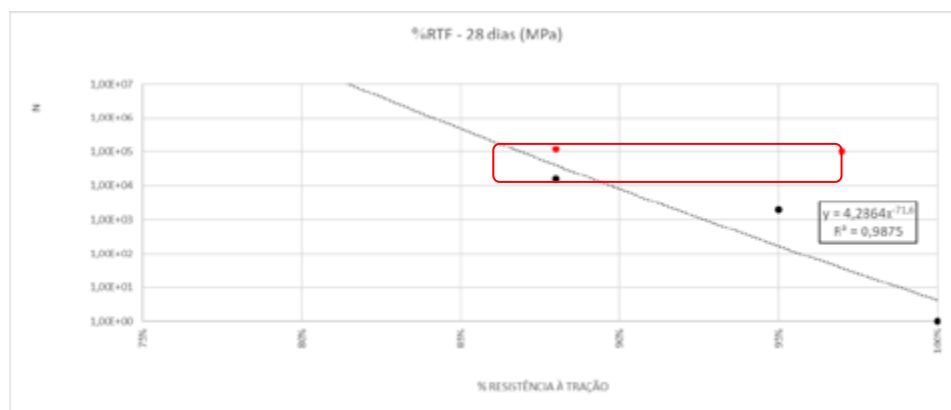
Figura 9. a) Resistência obtida no ensaio de RTf; b) Tenacidade na flexão

Os valores de resistência à tração na flexão apresentados na Figura 9a representam apenas o pico no momento da ruptura da matriz cimentada, já que a mistura com fibras apresentou resistência residual (maior tenacidade) devido à atuação das mesmas (Figura 9b). De fato, as RTfs em 3 pontos de ambas as misturas foram muito semelhantes. Provavelmente, as dimensões dos CPs prismáticos tenham traduzido melhor a preservação da resistência à tração mesmo com o ganho de flexibilidade das amostras, o que é um fator de grande valia. As fibras conferiram ainda uma maior resistência à propagação do trincamento à mistura cimentada, além de ser indicador de maior vida de fadiga.

Os resultados obtidos no ensaio de vida de fadiga estão apresentados na Figura 10. Foram ensaiados apenas cinco corpos de prova da mistura com fibras, sendo 03 CPs aos 28 dias de cura e 02 CPs com 28 dias de cura e 5 dias de secagem ao ar. Os CPs que passaram por secagem ao ar adquiriram uma resistência à fadiga adicional (pontos identificados em vermelho nos gráficos), quando comparada aos CPs que não passaram por esse processo. Os CPs com secagem ao ar atingiram 100.000 ciclos de elevado carregamento (> 88% da RTf) e não romperam. De qualquer forma, a atuação das fibras foi muito importante para que a mistura pudesse atingir o potencial de suportar 10^7 ciclos com até 82% da RTf, o que é um valor bastante considerável comparado ao desempenho da mistura sem fibras estudada por Prado (2018). A mistura estudada por Prado (2018) atingiria 10^6 ciclos (vida de fadiga indeterminada, segundo Austroads, 2004) com uma tensão não superior à 80% da RTf, enquanto a mistura com fibras aqui estudada atingiria esse desempenho com uma tensão não superior à 84% da RTf. Isso pode credenciando a mistura para ser de alto módulo e alta resistência à fadiga.



(a)



(b)

Figura 10. Resultado obtido no ensaio de fadiga para (a) deformação de tração (b) %RTf

CONCLUSÃO

A inserção da fibra de polipropileno na BGTC promoveu o melhoramento no que diz respeito ao desempenho mecânico desse material, aumentando a tenacidade que é a principal deficiência da BGTC tradicional.

Observando os resultados de resistência à tração de corpos de prova prismáticos, por possuir dimensões maiores, os resultados para a mistura com e sem fibra foram iguais. Apesar da BGTC com fibras e a BGTC tradicional apresentarem a mesma resistência à tração, vale destacar que a BGTC com a adição de fibras ficou mais flexível, ou seja, com uma rigidez menor, além de tenacidade bastante superior.

Outra característica que apresentou desempenho promissor foi a resistência à fadiga, em razão da mistura poder atingir em laboratório 10 milhões de ciclos sem ruptura com uma tensão menor ou igual a 82% da resistência à tração na flexão. Esse feito é bastante relevante pelo fato do desempenho em campo usualmente ser ampliado.

Os resultados obtidos nesta pesquisa promovem o compósito de BGTC+fibras a um material de grande potencial para uso em pavimentos que necessitam de alto desempenho. Esse fator é um ponto relevante para projetistas e tomadores de decisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106). Disponível em: <<https://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2012/11/28-Guia-basico-de-utilizacao-do-cimento-portland.pdf>>. Acesso dia 18/06 /2023.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 248: Agregado – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 7809: Agregado Graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro — Requisitos. Rio de Janeiro, 2008b.



[DOI: 10.29327/1430212.49-34](https://doi.org/10.29327/1430212.49-34)

**AVALIAÇÃO MECÂNICA DA BRITA GRADUADA TRATADA COM
CIMENTO CONTENDO FIBRA DE POLIPROPILENO MULTIFILAMENTO**

_____. NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 12261: Dosagem de brita graduada tratada com cimento — Procedimento. Rio de Janeiro, 2013b.

_____. NBR 12262: Execução de base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento — Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 215 A Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens da American Society for Testing and Materials, ASTM, 2014.

AUSTROADS Pavement Design: A Guide to the Structural Design of Road Pavements, Sidney, 2004

BACELAR, F. S. Influência do uso de fibras no desempenho mecânico da brita graduada tratada com cimento / Felipe Simões Bacelar; orientador Fernando Silva Albuquerque. São Cristóvão, SE, 2019.

BACELAR, F. S.; ALBUQUERQUE, F. S. Material granular cimentado com adição de fibras naturais ou sintéticas para uso na pavimentação. Depositante: Universidade Federal de Sergipe, BR 202020011843-4 U2. Depósito de patente: 12/06/2020.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. BONFIM, V. Fresagem de pavimentos asfálticos. 3.ed. São Paulo: Exceção Editorial, 2007.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNERME 162: solos: ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 201: solo-cimento: compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DER/SP- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO DER/SP-ET-DE-P00/009: Especificação Técnica: sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento. São Paulo, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 136-ME: pavimentação asfáltica: misturas asfálticas: determinação da resistência à tração por compressão diametral: método de ensaio. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 2018

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 181-ME: pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 2018

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. Soil stabilization – principles and practice. Sydney: Butterworths, 1972.

NEWCOMB, David E.; BUNCHER, Mark; HUDDLESTON, Ira J. Concepts of perpetual pavements. Transportation Research Circular, v. 503, p. 4-11, 2001.

NEWCOMB, David E.; WILLIS, Richard; TIMM, David H. Perpetual asphalt pavements: A synthesis. 2010.

PRADO, K. Estudo de critérios de dosagem para melhoria de desempenho mecânico de brita graduada tratada com cimento. 2018. 161p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018

SAPEM, South African Pavement Engineering Manual. 2014. South African National Roads Agency Ltd.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. Principles of pavement design. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1975



INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRA DE POLIPROPILENO NO DESEMPENHO MECÂNICO DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

Felipe Simões Bacelar¹ & Fernando Silva Albuquerque²

RESUMO

Uma das principais soluções de pavimentação para alto volume de cargas de tráfego nas rodovias é a utilização de base ou sub-base de materiais cimentados, entre eles, a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). Essa mistura fornece ao pavimento aumento da rigidez, contudo, como desvantagem, apresenta ruptura frágil e prematura por fadiga, ocasionando trincamentos e elevadas deformações, com danos à estrutura do pavimento. Isso acontece, principalmente, em razão da sua baixa tenacidade e resistência à tração, ocasionando processo de micro fissuração na sua estrutura interna. Em vista disso, esta pesquisa analisou o efeito nas propriedades mecânicas da BGTC a partir da inserção de fibras de polipropileno (comercialmente: Ultimax -monofilamento individual) e comparou com a mistura padrão (sem fibra), avaliando os parâmetros resistivos, como resistência à tração, tenacidade, resistência a compressão e módulo de elasticidade. De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, obteve-se melhoria no desempenho mecânico da BGTC com a inserção de fibras. Os ganhos nos parâmetros de resistência à tração foram de 38% e tenacidade de 1189%, ambos em comparação com a BGTC padrão sem fibras. Além disso, ocorreu redução da rigidez, evidenciada pela redução nos módulos de elasticidade, no entanto sem que houvesse perda na resistência a compressão ou tração do material. Esses parâmetros resistivos são fatores fundamentais no dimensionamento de pavimentos semirrígidos construídos com BGTC. Com isso, ressalta-se que é possível obter melhoras importantes no desempenho de pavimentos que utilizem BGTC com fibras, com possibilidades de ampliar a durabilidade da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Brita Graduada Tratada com Cimento; Fibra de polipropileno monofilamento; Desempenho Mecânico.

ABSTRACT

One of the main paving solutions for high volume of traffic loads on highways is the use of a base or sub-base of cement-treated materials, including Cement-Treated Crushed Stones (CTCS). This mixture provides increased pavement stiffness; however, as a disadvantage, it presents brittle and premature fatigue failure, causing cracking and high deformations, with damage to the pavement structure. This primarily occurs due to its low tenacity and tensile strength, resulting in microcracking within its internal structure. In view of this, this study analyzed the effect on the mechanical properties of CTCS from the insertion of polypropylene fibers (commercially: Ultimax - individual monofilament) and compared it with the standard mixture (without fibers), evaluating resistance parameters, such as tensile strength, tenacity, compressive strength and Young Modulus. According to the results obtained in this research, there was an improvement in the mechanical performance of CTCS with fiber incorporation. The gains in tensile strength parameters were 38%, and tenacity increased by 1189%, both compared to standard Cement-Treated Crushed Stones without fibers. Furthermore, there was a reduction in stiffness, evidenced by decreases in Young Modulus, however without any loss in compression or tensile strength of the material. These resistance parameters are fundamental factors in the design of semi-rigid pavements constructed with CTCS. Therefore, it is highlighted that significant improvements in the performance of pavements utilizing fiber reinforced CTCS can be achieved, with potential to enhance the durability of the structure.

KEY WORDS: Cement-Treated Crushed Stones; Polypropylene monofilament fiber; Mechanical Performance.

¹ Polícia Federal, felipebacelar1@gmail.com

² Universidade Federal de Sergipe, albuquerque.f.s@academico.ufs.br



DOI: [10.29327/1430212.49-27](https://doi.org/10.29327/1430212.49-27)

INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRA DE POLIPROPILENO
NO DESEMPENHO MECÂNICO DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

INTRODUÇÃO

No Brasil, o modal rodoviário representa significativa relevância no aspecto socioeconômico, uma vez que o transporte de cargas e o abastecimento das cidades por produtos ocorre através da malha rodoviária. Por essa razão, há uma necessidade de melhoria na concepção de projeto rodoviário no país, isso porque pavimentos deteriorados ocasionam perdas em diversos setores, por exemplo: perdas humanas; elevação dos custos de transporte; aumento do tempo de deslocamento etc.

A partir da década de 1970, pôde-se observar o uso crescente da mistura Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) na construção de rodovias no país. Esse fato está relacionado à necessidade de melhoria no desempenho dos pavimentos e de substituição de materiais utilizados até aquele momento, como Brita Graduada Simples (BGS) ou solo sem estabilizante químico (BALDO, 2007).

Esse material utiliza cimento e agregados britados em sua concepção, porém apresenta um custo e um potencial resistivo mais elevado, quando comparado aos materiais granulares convencionais de pavimentação. Essa mistura é caracterizada pela alta rigidez e, quando utilizada como camada do pavimento, apresenta concentração de tensões de tração nas fibras inferiores (BERNUCCI et al., 2022).

Apesar da BGTC apresentar elevada rigidez e menor custo de execução em comparação aos demais tipos de materiais cimentados (menor consumo de cimento Portland), várias pesquisas (PRADO, 2018; NASCIMENTO, 2017; e BALBO, 2006), têm demonstrado que a BGTC convencional apresenta elevada porosidade e heterogeneidade; baixa tenacidade e vida de fadiga. Assim, observa-se a necessidade de melhorias nas suas características físicas, e, por conseguinte, melhoria no comportamento mecânico.

Com o intuito de melhorar as características dos materiais cimentícios, como a BGTC, sugere-se utilizar fibras em meio a essa matriz cimentícia. A adição de fibras origina um material com novas características, denominado compósito. Este apresenta dois ou mais materiais diferentes, que formam uma estrutura macroscópica heterogênea e desenvolvem características intermediárias aos materiais isolados (GIBSON, 1994).

A inserção de fibras ao conjunto de BGTC pode ampliar as características críticas da matriz, o que faz melhorar principalmente sua resistência à tração, tenacidade e vida de fadiga. Esses fatores são de grande importância para evitar a degradação de camadas do pavimento construídas com BGTC.

Este trabalho objetiva apresentar algumas dessas melhorias mecânicas alcançadas para uma BGTC com adição de fibras de polipropileno monofilamento em comparação à BGTC padrão sem fibras. Essa fibra é uma das estudadas em uma pesquisa tecnológica mais ampla, envolvendo fibras com características físicas e mecânicas distintas.

REFERENCIAL TEÓRICO

A BGTC é definida pela norma brasileira ANBT, 2013, como sendo uma mistura de pedra britada e cimento Portland (aproximadamente de 3 a 5% em massa da mistura total). Entre as características desse material, destaca-se o aumento na capacidade de suporte às tensões de tração e compressão, visto que, após adição do aglomerante hidráulico, a camada granular que trabalhava apenas a compressão, passa a ser solicitada em sua parte inferior por tensão de tração (BALBO, 2007).

Salienta-se que as camadas cimentadas, ao se utilizar o aglomerante hidráulico, apresentam fissuras por retração inerentes ao seu processo de cura (PINTO, 1991). Além disso, camadas estabilizadas quimicamente com cimentação desenvolvem um processo de fadiga mais acelerado, visto que sua



matriz é mais heterogênea e composta por menor teor de cimento em relação a outros materiais cimentados, como o concreto compactado a rolo. Com isso, devido a sua natureza quase-frágil, as camadas podem apresentar fissuração excessiva, bem como redução da rigidez com grande presença de nucleação (YEO, 2011).

As características físicas e propriedades mecânicas dos compósitos dependem dos componentes empregados na mistura. A BGTC apresenta boa resistência à compressão, não sendo esse um fator que limita a utilização na pavimentação, contudo sua resistência à tração e vida de fadiga são fatores que dificultam seu uso. Então, com o intuito de melhorar determinadas características que a matriz, isoladamente, apresenta deficiência, pode-se utilizar em conjunto com outro material, como as fibras.

No caso das matrizes cimentícias, ao serem unidas às fibras, interagem positivamente nas deficiências desse tipo de matriz, garantindo uma melhoria na resistência à tração, na vida de fadiga e na tenacidade. Cabe ressaltar que com a utilização de fibras há necessidade de maior energia de compactação para se chegar ao mesmo grau de compactação, quando comparado ao material sem fibras (ROOHOLAMINI; HASSANI; ALIHA, 2018).

A resistência à tração, tenacidade, controle de fissuração e vida de fadiga tendem a apresentar melhorias mais significativas com a utilização de fibras. Ademais, os compósitos passam a apresentar uma resistência residual, em que, embora a matriz tenha natureza de ruptura frágil ou quase frágil, o conjunto tende a apresentar uma ruptura dúctil ou quase dúctil, em razão da adição de fibras (ROOHOLAMINI; HASSANI; ALIHA, 2018; PEREIRA, 2017; PONS *et al.*, 2007; YAO; LI; WU, 2003; FIGUEIREDO, 2000).

No desempenho à tração dos compósitos com fibras, até a primeira fissura, a ruptura do material é determinada pela matriz cimentícia. Após o início da fissuração da matriz, as tensões são suportadas pelas fibras, em que os valores resistivos apresentam gradual decréscimo de acordo com a deformação até a ruptura. Esse fato é característico do arrancamento das fibras da matriz, denominado *pullout* (PEREIRA, 2017; HANNANT, 1978). Assim, ao adicionar fibras, essas trabalham de maneira similar ao grampo ou tirante, em que estabiliza os agregados em ambos os lados da fissura. Com isso, a fibra absorve a tensão de tração da seção da fratura, por conseguinte a concentração de tensão na área fissurada é reduzida. Devido a isso, ocorre um decréscimo do efeito do dano por trincamento e uma melhora da ductibilidade do compósito (ZHANG; LI, 2009).

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais utilizados no compósito BGTC e fibras

Conforme Figura 1a, os agregados britados utilizados nas misturas de BGTC apresentam dimensões características diferentes, totalizando cinco tipos: brita 31,5 mm, brita 19,0 mm, pedrisco, pó de pedra e filler. Ademais, fez-se necessária adição de areia fina para atingir o teor de finos necessários à composição granulométrica da curva granulométrica de diâmetro máximo de 25 mm do SAPEM (2014).

Para obtenção das características dos agregados foram realizados os ensaios de acordo com suas respectivas normas. Na Tabela 1 é apresentada a porcentagem de material que passa nas respectivas peneiras. As peneiras utilizadas foram sugeridas pela norma Sul-africana (SAPEM, 2014) em conjunto com norma do DER/SP (DER/SP, 2005). Obteve-se uma média de dois ensaios para cada tipo de agregado e apresentaram-se, entre outros aspectos, as dimensões máximas características



DOI: 10.29327/1430212.49-27

INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRA DE POLIPROPILENO NO DESEMPENHO MECÂNICO DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

dos agregados, conforme NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003). Com isso, classificaram-se como: brita 31,5 mm, brita 19 mm, pó de pedra, areia e filler.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Agregados utilizados nas misturas de BGTC; (b) Fibra de polipropileno monofilamento.

Tabela 1. Análise granulométrica dos agregados.

Peneiras (mm)	% passante em massa em cada fração				
	Brita 31,5 mm (%)	Brita 19,0 mm (%)	Pó de Pedra (%)	Areia (%)	Filler (%)
37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
25,0	96,03%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
19,0	35,90%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
9,5	1,44%	61,27%	100,00%	100,00%	100,00%
4,8	0,83%	2,65%	96,48%	100,00%	100,00%
2,0	0,61%	1,00%	64,07%	100,00%	100,00%
0,42	0,53%	0,82%	26,51%	94,64%	100,00%
0,15	0,44%	0,74%	14,54%	12,90%	97,25%
0,075	0,31%	0,59%	5,79%	0,74%	84,30%
Massa Específica Real (g/cm ³)*	2,89	2,69	2,81	2,63	2,74
Absorção (%)*	0,82	0,92	0,95	-	-

*Prado (2018)

Os resultados de massa específica real e absorção para cada tipo de brita estão apresentados na Tabela 1. Os ensaios de absorção foram realizados apenas para os agregados que tinham material retido na peneira 4,8 mm (brita 31,5 mm, brita 19 mm e pó de pedra). Tais frações são importantes para o cálculo da quantidade de água adicionada na mistura de BGTC, devido a capacidade de absorção dos agregados graúdos.

Outros resultados observados foram o índice de forma (o qual apresentou o valor de 2,4) e a perda por abrasão Los Angeles de 16% (dezesseis por cento). A partir desses valores, observa-se que os referidos agregados atendem às exigências prescritas pelas normas (ABNT, 2013b; DER/PR, 2005; DER/SP, 2005).

Para compor a mistura de BGTC, foi escolhido o cimento do tipo II (CP II-Z-32 RS), o qual contém pequena adição de pozolana (Z) e apresenta-se como Resistente a Sulfato (RS). Essa escolha foi pautada em sua larga utilização na construção civil e por ter boas propriedades de durabilidade e resistência aos agentes químicos presentes no solo (DER/PR, 2005), bem como atende às condições da norma (ABNT, 2013a).



A fibra utilizada apresenta aspecto físico de monofilamento individual de espessura grossa (quando comparado a outros tipos de fibras), medindo 54 mm de comprimento, sendo considerada macrofibra (Figura 1b). Este material apresenta certa rugosidade para melhorar a ancoragem com a matriz. Em relação ao aspecto químico, essas fibras sintéticas são compostas por uma “mescla de poliolefinas”, verificando-se a boa compatibilidade com o cimento e os agregados. Outras características fornecidas pelo fabricante: a) Módulo de elasticidade: 9 GPa; b) Resistência à tração: 550 - 600 MPa; c) Fibras por kg: 62.500; d) Densidade (g/cm^3): 0,91; e) Resistência a álcalis: total; f) Condutividade elétrica: nula; g) Absorção: nula; e h) Ancoragem: físico/química.

Nesse processo, foram considerados alguns aspectos físicos e viabilidade econômica para sua incorporação à mistura, visto que não haveria aplicação prática testar um material que fosse economicamente inviável. Para tanto, o valor financeiro das fibras incorporadas à BGTC não deveria superar 50% do preço comercial desse material. Esse custo adicional de 50% foi arbitrado nessa pesquisa, mas pode variar de acordo com vários fatores, entre eles: limite orçamentário; relação benefícios/custos maior que para BGTC tradicional; qualquer característica específica pretendida pelo projetista.

Com isso, o percentual em volume de fibras de polipropileno monofilamento adicionado à mistura foi de 0,5%, o qual já conferiu expressivos ganhos de tenacidade à mistura, conforme será discutido ao longo desse trabalho. Esse percentual em volume foi convertido em massa para a realização da sua mistura com agregados, cimento e água.

Neste trabalho, optou-se por utilizar uma das misturas estudadas por Prado (2018), cujos insumos eram os mesmos. A mistura escolhida era denominada “5B (-1)”, sendo: o numeral “5” referente a 5% de cimento em massa; a letra “B” refere-se à faixa granulométrica utilizada (SAPEM, 2014); e, por último, o numeral “-1”, faz referência à utilização de -1% (percentual referente à massa da mistura) abaixo da umidade ótima do material. Utilizou-se 5% de cimento e 1% abaixo da umidade ótima, pois foi a mistura que apresentou melhores características mecânicas no referido trabalho.

Após definidos os percentuais passantes em cada diâmetro de referência da faixa granulométrica, encontraram-se as seguintes proporções por tipo de agregado: 20,00% de brita 31,5 mm; 26,00% de brita 19,0 mm; 46,00% de pó de pedra; 3,50% de filler; 4,50% de areia.

Após encontrada a curva ajustada para os agregados, foi realizada uma correção para determinação da massa dos agregados em função da porcentagem fixa de cimento em massa (5%), visto que a porcentagem do cimento em massa entra na contabilização da mistura, ou seja, deve haver substituição dos agregados para inclusão do cimento.

Além disso, a mesma quantidade de material retido na peneira 19 mm foi substituído por material passante na 19 mm e retido na 4,8 mm, devido à necessidade de compatibilização do comprimento das fibras com os agregados e CPs. Portanto, houve alteração na faixa granulométrica inicial, sendo ajustada conforme os parâmetros indicados, resultando em uma granulometria com maior superfície específica, o que resultaria na necessidade de mais água. Essas condições certamente resultaram em uma mistura com umidade além de 1% abaixo da ótima, o que se tornou importante para avaliar a capacidade de homogeneização das fibras na mistura, mesmo na deficiência de água.

Avaliações realizadas às misturas

A energia de compactação utilizada foi a Proctor modificada, uma vez que, grande parte das referências bibliográficas consultadas demonstrou ganho no desempenho mecânico da BGTC com a utilização dessa energia (Klinsky; Farias, 2016; Yeo, 2011; SAPEM, 2014; AUSTRROADS, 2008).

DOI: [10.29327/1430212.49-27](https://doi.org/10.29327/1430212.49-27)

INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRA DE POLIPROPILENO NO DESEMPENHO MECÂNICO DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

As características de compactação estão apresentadas na Tabela 2. Como a adição de fibras altera em menos de 0,5% a massa da mistura, não houve alteração da umidade e peso específico aparente seco máximo da mistura. Ademais, esses valores serviram para subsidiar o cálculo da quantidade de água adicionada à mistura para atingir a correta umidade de moldagem dos corpos de prova (CP) para os ensaios.

Tabela 2. Resultado de ensaios (PRADO, 2018).

Parâmetros	Resultados
Teor de Cimento	5%
Peso específico aparente seco máximo	22,36 kN/m ³
Teor de umidade de moldagem (fração passante na peneira 4,8 mm)	(9,8)-(1,00) = 8,8%
Relação água/cimento	1,96

Inicialmente os agregados foram separados percentualmente de acordo com Tabela 1. Em seguida foram divididos pela peneira 19 mm. Caso houvesse material retido nessa peneira, ocorreria uma substituição em massa da quantidade desse material retido por um material que passa na peneira 19 mm e fica retido na 4,8 mm. Esse procedimento, estabelecido pela DNER-ME 162/94, serviu para garantir que o diâmetro máximo do agregado fosse 19 mm, assim havendo compatibilidade com os moldes e o tamanho das fibras utilizadas. Além disso, fez-se o peneiramento na peneira 4,8 mm com a finalidade de determinar a massa passante e a retida. Isso serviu para determinação da água adicionada na moldagem dos corpos de prova.

Com o resultado das frações passantes e retidas na peneira 4,8 mm das amostras já separadas foi realizado o cálculo da água. Para a fração retida é considerada a água de absorção do agregado gráudo, conforme DNER-ME 162/94. Já para o material passante, o cálculo é similar à determinação da quantidade de água que deve ser adicionada para atingir a umidade de moldagem.

Com isso, foram confeccionados os corpos de prova para cada tipo de ensaio a fim de analisar as variações dos parâmetros para as misturas com e sem adição de fibras. No processo de confecção dos CPs, as fibras foram inseridas em meio aos agregados e cimento durante o processo de homogeneização à seco. Só após essa etapa a água foi adicionada à mistura. O processo de homogeneização da mistura úmida com fibras foi relativamente simples. Contudo, devido às dimensões reduzidas do molde cilíndrico de compressão, durante o processo de colocação do material no seu interior, percebeu-se que as fibras não mantinham um padrão direcional único para CPs diferentes, o que sugere ser a causa da possível diferença nos ganhos de resistência proporcionados entre eles. Os CPs foram moldados na energia Proctor modificada e após a moldagem os CPs foram embalados com filme plástico para que se iniciasse a pega do cimento e possibilitasse a retirada do CP sem causar danos. Após 24 horas, os CPs foram desmoldados e imediatamente embalados em um filme plástico novamente para que houvesse a cura do cimento, durante 28 dias em temperatura e umidade ambiente, simulando assim as películas impermeabilizantes para a cura em condições de obra.

Os parâmetros analisados nesse trabalho foram Resistência à Tração na Flexão (RTf) e Tenacidade, Resistência à Compressão (RCS) e Módulo de Elasticidade (E). Os métodos adotados, resultados obtidos e discussões são apresentados nos itens seguintes.

Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Elasticidade (E)

Os ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Elasticidade (E) foram realizados em corpos de prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, compactados



na energia Proctor modificada por impacto em cinco camadas. O grau de compactação de no mínimo foi definido em 100% (até + 2% desse valor) e uma umidade poderia ter desvio de $\pm 0,5\%$. Para determinar a resistência à compressão simples foi realizado o ensaio de compressão axial nas misturas. O ensaio foi realizado de acordo com NBR 5739 (ABNT, 2007). Durante o ensaio o carregamento foi aplicado com velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s até a queda brusca da força, o que indica a ruptura do CP.

Já o ensaio para obtenção do módulo de elasticidade foi realizado conforme o método utilizado para concretos, de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2008), visto que ainda não havia padrão para a BGTC na época da pesquisa. Para iniciar o ensaio, foi necessário que se soubesse o valor de resistência à compressão simples da mistura ensaiada, pois a determinação do módulo de elasticidade é realizada na tangente inicial, ou seja, a 30% do valor da resistência à compressão.

Em cada lado do CP, no terço médio de sua altura (Figura 2), foram instalados dois extensômetros (dispositivos para medir as deformações). A velocidade de carregamento e descarregamento foi de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. A tensão foi aplicada até que se atingisse 30% da tensão de compressão do material e esse nível de tensão foi mantido por 60 segundos. Decorrido esse tempo, a carga foi reduzida (com a mesma velocidade do carregamento) até atingir a tensão de 0,5 MPa, para que o contato entre a prensa e o CP não fosse perdido. O procedimento de carga e descarga foi repetido por 4 vezes e o módulo de elasticidade calculado a partir da relação entre tensão de compressão na seção transversal do CP e sua respectiva deformação específica na mesma direção.

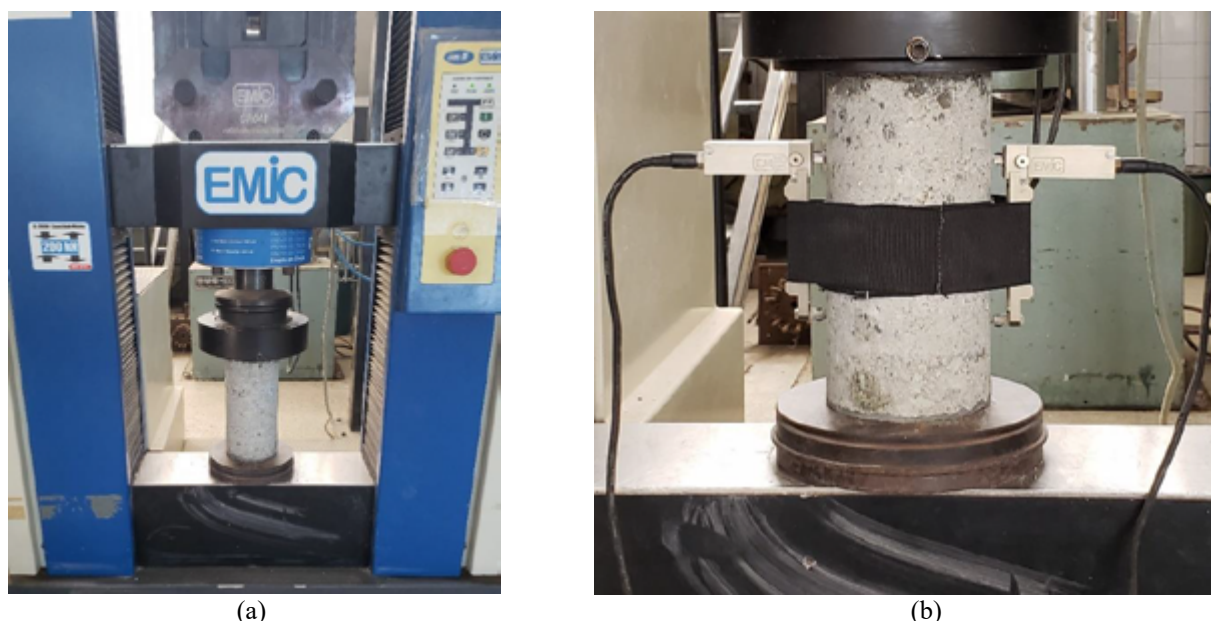


Figura 2. Ensaio em misturas cimentadas: a) Resistência à Compressão Simples; b) Módulo de Elasticidade.

Ensaio de Resistência à Tração na Flexão (RTf) e Tenacidade na Tração na Flexão (TTF)

Os CPs utilizados tinham forma prismática com dimensões de 10 cm de largura, 10 cm de altura e 40 cm de comprimento, de acordo com os padrões do protocolo NCHRP (2014). Essas distâncias são definidas conforme o diâmetro máximo do agregado, segundo preconiza a norma AS1012 (STANDARDS AUSTRALIA, 2000) e a norma ASTM C78/C78M-15b (ASTM, 2015).

DOI: [10.29327/1430212.49-27](https://doi.org/10.29327/1430212.49-27)

INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRA DE POLIPROPILENO NO DESEMPENHO MECÂNICO DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

A compactação dos CPs foi realizada pela prensagem estática do CP, executada em 3 (três) camadas de mesma altura. A massa total da mistura de BGTC, que foi inserida em cada viga, foi definida a partir do peso específico aparente seco máximo, da umidade ótima e do volume do CP. A prensagem foi realizada por uma força de compressão variável e crescente, aplicada até que se chegasse à altura desejada, a fim de garantir o grau de compactação desejado ($100\% \pm 2\%$) para energia Proctor modificada.

A prensa utilizada foi uma máquina universal de ensaios, cuja célula de carga acoplada na prensa tem capacidade de 200 kN. Utilizou-se um pórtico específico para aplicar o carregamento em quatro pontos. Esse implemento caracteriza-se por aplicar duas cargas concentradas no terço médio na parte superior (distantes 10 cm entre os pontos de carregamento) e simplesmente apoiado em dois pontos na parte inferior (distantes 30 cm entre os pontos de apoio). Essa configuração permite que a aplicação da carga seja imposta como uma flexão pura no terço médio da vigota.

A aplicação da carga foi realizada de maneira contínua e sem choque. A taxa de carregamento foi de 0,9 MPa/min até a ruptura do CP, como descreve a ASTM C78 (2015). Para o cálculo da resistência, foi analisado o local de ruptura de cada CP, visto que há duas possíveis equações, diferenciando-se em razão do local da trinca.

Caso o trincamento ficasse dentro ou fora ($< 1,5$ cm) do terço médio da vigota, a resistência seria encontrada, respectivamente, por:

$$RTf(MPa) = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$

$$RTf(MPa) = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (2)$$

Onde: RTf = resistência à tração na flexão em quatro pontos (MPa); P = carga máxima aplicada (N); L = dimensão do vão entre apoios (mm); a = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm); b = largura média da viga (mm); h = altura média da viga (mm).

Com o resultado do ensaio de RTf, foi possível medir o valor da tenacidade, que é equivalente a área do gráfico do ensaio (Carga x Deflexão). A área desta curva é delimitada pelo seu ramo ascendente e seu ramo descendente, até que se atinja um patamar de 40% da Força Máxima no ramo descendente. Com isso, é possível determinar a energia absorvida sob tensão de tração no ensaio de flexão estática, encontrando-se a tenacidade (TTF). Com o *software* AutoCAD, foi possível calcular as áreas de cada gráfico construído para os CPs.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da execução dos ensaios e obtenção dos resultados de RCS, E, RTf e TTF, foi possível avaliar como as fibras interagem com a mistura antes e após a ruptura da matriz cimentada, contabilizando as vantagens e desvantagens de sua inserção na mistura de BGTC.

Observando os resultados de RCS (Tabela 3), constata-se um decréscimo de 13% na resistência à compressão da mistura com fibras, mas mantendo um valor bem acima do mínimo requerido para este tipo de material (conforme NBR 12261/2013, valor de resistência média deve ser maior que 3,5 MPa). Isso não corresponde, necessariamente, a um resultado indesejado, pois é um indicativo de ganho de flexibilidade à mistura, o que reduz também os níveis de tensões no material ao se aplicar carregamentos.



Também pôde-se constatar que houve uma tendência de decréscimo do módulo de elasticidade sob compressão com a inserção das fibras (Tabela 4). Com isso, o compósito passou a ter uma tendência a ser menos rígido que a BGTC tradicional. Como a redução de rigidez do compósito em comparação à BGTC tradicional foi maior que a redução de RCS, a relação mais baixa e favorável entre módulo de elasticidade e resistência à compressão foi da mistura com fibras. Essa constatação configura-se como um dos benefícios da utilização das fibras, pois pode conferir também maior durabilidade ao material.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de resistência compressão simples.

Tipo de Fibra	RCS [MPa]	Média [MPa]	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Percentual de Ganho
Sem Fibras	8,35 8,06	8,21	0,20	2,50%	0%
Fibra de Polipropileno Monofilamento	6,87 7,44	7,15	0,40	5,54%	-13%

Tabela 4. Resultado do ensaio de Módulo de Elasticidade.

Tipo de Fibra	E [GPa]	Média [GPa]	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Percentual de Ganho	E / RCS
Sem Fibras	10,14 11,12	10,63	0,69	6,52%	0%	1295
Fibra de Polipropileno Monofilamento	7,17 7,79	7,48	0,44	5,86%	-30%	1046

A partir do ensaio de tração na flexão em quatro pontos, foi possível observar o trabalho das fibras após a ruptura da matriz, em que ocorre um pico de força em aproximadamente 0,5 mm de deformação e depois a força decresce. Logo após essa queda ocorre um crescimento das curvas de resistência residual, em que é possível identificar o trabalho das fibras (Figura 3).

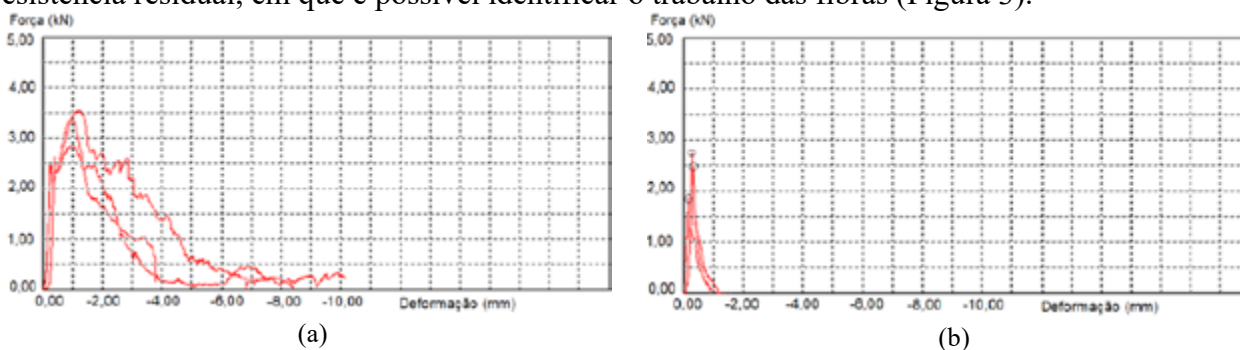


Figura 3. Ensaio de flexão em 4 pontos: a) BGTC com fibras; e b) BGTC sem fibras.

Além disso, salienta-se que a ruptura inicial do compósito ocorre no mesmo patamar de força (2,5 kN), ou seja, o mesmo nível em que ocorre a ruptura da BGTC sem fibra. Assim, verifica-se que as fibras não atuam antes da ruptura da matriz e não fornecem significativos ganhos de resistência inicial de tração à matriz.

Nos gráficos da Figura 3, fica evidente o trabalho das fibras, sendo observados os acréscimos e os decréscimos de tensões (após o pico máximo), após atuarem até os seus arrancamentos (Figura 4). O resumo dos resultados de RTf está apresentado na Tabela 5.

A fibra avaliada apresentou bom desempenho no ensaio de tração na flexão. Fica evidente a boa compatibilidade desse tipo de fibra com a matriz de BGTC para suportar as tensões de tração impostas ao compósito, provavelmente devido à semelhança entre sua rigidez e a da matriz de



DOI: 10.29327/1430212.49-27

**INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRA DE POLIPROPILENO
NO DESEMPENHO MECÂNICO DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO**

BGTC (módulos de elasticidade semelhantes). Observa-se boa aderência entre a fibra e a matriz, resultando em bom desempenho também após a ruptura da matriz (Tabela 6).



Figura 4. Evolução e detalhe do trabalho das fibras do ensaio de flexão em 4 pontos.

Tabela 5. Resultado do ensaio de Resistência à Tração na Flexão em 4 pontos.

Tipo de Fibra	Grau de Compactação	de RTf [MPa]	Média [MPa]	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Percentual de Ganho/Perda	Deformação na Ruptura
Sem Fibras	100,2%	0,56	0,71	0,06	8,38%	-	886,96
	100,1%	0,83					1513,04
	99,9%	0,75					1721,74
Fibra Ultimax	98,7%	0,86	0,98	0,10	10,51%	38%	5217,39
	99,6%	1,01					6365,22
	98,0%	1,06					6104,35

Em relação a deformação na ruptura, observa-se que as misturas deste trabalho apresentaram elevada deformação na ruptura em comparação com valores evidenciados na literatura para BGTC, além disso pode-se verificar aumento da referida deformação quando na utilização de fibra em conjunto com a BGTC. Salienta-se que mesmo havendo aumento da deformação na ruptura para as misturas de BGTC com fibra, houve bons resultados de RTf, inclusive com ganho resistivo em comparação à BGTC padrão sem fibra.

Diante dos resultados obtidos, pode-se constatar elevados ganhos de Tenacidade (Tabela 6). Isso ocorreu devido a tensão de tração residual fornecida pelas fibras após a ruptura da matriz, no ensaio de flexão. Ademais, notam-se valores elevados para o coeficiente de variação, que pode ter acontecido em razão do arranjo das fibras em cada CP, assim influenciando na resistência residual de cada CP. Dependendo de tal arranjo, houve maior ou menor número de fibras atuando no eixo tracionado, influenciando na disponibilidade de atuação de uma fibra após o arrancamento de outra.

Tabela 6. Resultado de Tenacidade na Tração na Flexão em 4 pontos.

Tipo de Fibra	Grau de Compactação	TTF [N.mm]	Média [MPa]	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Percentual de Ganho/Perda
Sem Fibras	100,2%	361,34	395,57	37,41	9,46%	-
	100,1%	389,87				
	99,9%	435,51				
Fibra de Polipropileno Monofilamento	98,9%	4315,56	5097,55	1579,92	30,99%	1189%
	99,5%	4061,13				
	99,0%	6915,96				



CONCLUSÕES

O compósito formado por Brita Graduada Tratada com Cimento e fibras de Polipropileno Monofilamento pode fornecer expressivas melhoras de flexibilidade, resistência à tração e tenacidade em comparação à BGTC tradicional.

Para as misturas ensaiadas nessa pesquisa, a relação entre rigidez e resistência (módulo de elasticidade e resistência) reduziu com a inserção de fibras, o que pode ser um fator positivo para suportar mais ciclos de carregamento.

No ensaio de resistência à tração na flexão em 4 apoios, pôde-se observar o trabalho das fibras mesmo após o rompimento da matriz, em que foi evidenciado um ganho de 38% nesse parâmetro resistivo devido a adição de fibras.

Na avaliação de tenacidade à flexão, quando se constatou um ganho de 1189% nessa característica após a adição das fibras, o comportamento à ruptura do material passou de quase-frágil da BGTC tradicional, para uma ruptura dúctil do compósito.

Ressalta-se a boa compatibilidade entre a matriz e as fibras de polipropileno, as quais apresentam módulos de elasticidade em patamares similares. Além de seus aspectos físicos favorecerem à ancoragem das fibras, que apresentam certa rugosidade com a finalidade de fornecer mais ancoragem e mais tração entre a matriz e as fibras.

O compósito formado por Brita Graduada Tratada com Cimento e fibras de Polipropileno Monofilamento obteve expressivas melhoras mecânicas a um custo competitivo com a inserção das fibras. Isso pode torná-lo em um material relevante para a aplicação em pavimentos semirrígidos e rígidos de alto desempenho estrutural.

As limitações do trabalho se dão devido à grande variedade de tipos de fibras (material de composição da fibra, comprimento e aspecto) que podem ser utilizadas. Além disso, alteração no teor de cimento (em quantidades menores àquelas apresentadas neste trabalho) pode influenciar sobremaneira na interação e aderência entre as fibras e a matriz de BGTC. Esses fatores podem interferir diretamente no resultado alcançado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

_____. NBR NM 248: Agregado – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão e corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 12261: Dosagem de brita graduada tratada com cimento — Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 11803: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento — Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM, C78/C78M: Standard Test Method for Flexural Strength of concrete (using simple beam with third-point loading), ASTM, 2015.

AS 1012.11-2000 - Methods of testing concrete: method 11: determination of the modulus of rupture, STANDARDS AUSTRALIA, 2000.

AUSTROADS Technical Report. **The development and evaluation of protocols for the laboratory characterization of cemented materials** 2008.



DOI: [10.29327/1430212.49-27](https://doi.org/10.29327/1430212.49-27)

**INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRA DE POLIPROPILENO
NO DESEMPENHO MECÂNICO DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO**

BALBO, J. T. Brita graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura, Transportes, volume XIV, número 1, junho de 2006. ISSN: 1415-7713.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**, São Paulo, Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. L. B; MOTTA, L. M. G.; SOARES, J. B.; CERATTI, J. A. P., **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: 2ª Edição PETROBRAS. ABEDA, 2022.

DER/SP- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO DER/SP-ET-DE-P00/009: Especificação Técnica: sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento. São Paulo, 2005.

DER/PR - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ DER/PR-ESP-P16: **Pavimento**: brita graduada tratada com cimento. Paraná, 2005.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNER-ME 162: Solos-Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994b.

FIGUEIREDO, A. D. 2000. **Concreto com Fibras de Aço**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/260. 68p.

GIBSON, R. F. 1994. **Principles of Composite Material Mechanics**. Detroit: McGraw-Hill, Inc.

NASCIMENTO, R. **Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR101/SE**. 2017. 143p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis**: NCHRP – Report 789. Washington, D.C. 82p. 2014.

HANNANT, D. J. 1978. **Fibre Cements and Fibre Concretes**. Chichester: John Wiley.

SAPEM, **South African Pavement Engineering Manual**. 2014. South African National Roads Agency Ltd.

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V.C. **Estudo da Influência do Teor de Cimento Portland, da Energia de Compactação e da Umidade no Comportamento Mecânico da Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados**. 2015, 153p, Relatório. Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) e Concessionária CCR Nova Dutra, Grupo CCR, Rio de Janeiro.

PEREIRA, G. B. S. Comportamento à flexão de vigas de concreto autoadensável armado reforçado com fibras de aço. Rio de Janeiro, 2017.

PINTO, Salomão. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Rio de Janeiro, 1991.

PONS, G., MOURET, M., ALCANTARA, M., GRANJU, J. L. 2007. **Mechanical behaviour of self-compacting concrete with hybrid fibre reinforcement**. Materials and Structures, vol. 40, n. 2, pp. 201-210.

PRADO, K. **Estudo de critérios de dosagem para melhoria de desempenho mecânico de brita graduada tratada com cimento**. 2018. 161p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.

ROOHOLAMINI, H.; HASSANI, A.; ALIHA, M. R. M. Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 517-529, 2018.

YAO, W.; LI, J.; WU, K. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. **Cement and concrete research**, v. 33, n. 1, p. 27-30, 2003.

YEO, Y.S. **Characterization of cement-treated crushed rock base course for Western Australian Roads**, 2011, 227p, Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Curtin University, School of Civil and Mechanical Engineering, Australian.

ZHANG, P.; LI, Q. **Effect of polypropylene fiber on mechanical and shrinkage properties of cement stabilized macadam**. International Journal of Pavement Engineering, v. 10, nº 6, p. 435-445, 2009. <https://doi.org/10.1080/10298430802363985>



ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO USO DA FIBRA DE PVA EM PAVIMENTO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Valeria Cristina de Faria¹; Artur Teixeira Herculano²; Claudia Azevedo Pereira²; Rodrigo Maziero Folgado²; Eriadi Sumodjo³;

¹ Plena Infra, valeria2008.faria@gmail.com

² Instituto Tecnológico de Aeronáutica, arturth@gmail.com, claudia.azevedo@ita.br, rodrigo.folgado@ga.ita.br

³ Kts, eriadi@ktsdesign.eng.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a trabalhabilidade medida através do abatimento do tronco de cone da mistura de concreto de cimento Portland com adição de fibra de polivinil álcool (PVA) e as propriedades mecânicas. Esse concreto foi aplicado em um trecho experimental de uma praça de pedágio localizada próxima a cidade de Inocência, em Mato Grosso do Sul. A fibra de PVA é uma fibra sintética produzida a partir da resina de álcool polivinílico comercializada desde 1950 no Japão, primeiramente com o intuito de substituir o amianto no fibrocimento, sendo posteriormente usada como reforço no concreto e argamassa. Dentre suas principais características, a fibra de PVA apresenta alta resistência à tração, alto módulo de elasticidade, baixo alongamento, ótima aderência à matriz cimentícia, resistência alcalina, resistência ao UV e resistência à corrosão, além da baixa densidade em comparação a fibra de vidro e principalmente aço. As fibras atuam controlando a formação e propagação de fissuras, aumentando a ductilidade, conferindo resistência à tração após fissuração, aumentando a tenacidade e resistência à fadiga e impacto do concreto. Visto que os pavimentos são submetidos a grandes carregamentos provenientes de maquinário, pousos e decolagens de aviões de maneira contínua, o uso de materiais usados como reforço são comuns visando o aumento da durabilidade e redução da manutenção do mesmo. Após a construção do trecho verifica-se que a adição da fibra de PVA teve um desempenho adequado sob o aspecto da trabalhabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: concreto reforçado com fibras; fibra de PVA; trabalhabilidade; durabilidade.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate PVA fiber influence in Portland concrete workability through slump measurement and mechanical properties. This concrete was used in the pavement in an experimental lane of a toll plaza located near the city of Inocência in Mato Grosso do Sul. PVA fiber is a synthetic fiber produced from polyvinyl alcohol resin sold since 1950 in Japan, initially to replace asbestos in fiber cement, and later used as reinforcement in concrete and mortar. Among its main characteristics, PVA fiber has high tensile strength, high modulus, low elongation, excellent adhesion to the cement matrix, alkaline resistance, UV resistance, and corrosion resistance, in addition to low density compared to glass fiber and especially steel. The fibers act by controlling the formation and propagation of cracks, increasing ductility, providing tensile strength after cracking, and increasing toughness and resistance to fatigue and impact. As pavements are subject to large loads from machines, aircraft landings, and take-offs continuously, it is common to use materials used as reinforcement, to increase durability and reduce maintenance. After the construction of the section, it was found that the addition of the PVA fiber did not affect the concrete's workability, and the construction was successful.

KEY WORDS: fiber reinforced concrete; PVA fiber; workability; durability.



DOI: [10.29327/1430212.49-50](https://doi.org/10.29327/1430212.49-50)

ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO USO DA FIBRA DE PVA EM PAVIMENTO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção devido às suas características, como por exemplo, elevada resistência à compressão e facilidade na moldagem independentemente da forma da peça desejada. No entanto, uma das desvantagens apresentadas pelo concreto é a sua baixa resistência a tração (Daneshfar et al., 2023; Lau et al., 2020) que combinada com seu comportamento frágil (Alsaif et al., 2019; Daneshfar et al., 2023; Noushini et al., 2013) ocasiona a formação e propagação de trincas causadas pela retração e por ser submetido às cargas variáveis, podendo levar o material à falha.

Quando o concreto simples é submetido a tensões de tração, as primeiras microfissuras são iniciadas em regiões que demonstram maior fragilidade do concreto, as Zonas de Transição Interfacial (Mehta; Monteiro, 2006). À medida que crescem e se interconectam através da matriz cimentícia, um conjunto de microfissuras converte-se em uma microfissura. Como resultado, a presença dessa microfissura diminui a seção transversal efetiva do concreto, demandando assim a redistribuição das tensões para áreas onde o concreto permanece mais íntegro (Leite et al., 2023; Zhang et al., 1999).

Uma das soluções desenvolvidas para resolver este problema foi o uso de fibras como reforço em concretos e argamassas. Com a sua adição, as tensões as quais o concreto é submetido passam a ser transferidas de forma distribuída por todo o seu volume (Carlesso et al., 2019; Graeff et al., 2012; Noushini et al., 2013), aumentando sua resistência, melhorando o controle de fissuras e com isso sua vida útil. Ou seja, a presença das fibras, tem a capacidade de desacelerar o crescimento das fissuras, atuando como uma espécie de ponte entre os dois lados de uma mesma microfissura (de Souza et al., 2023). Por este motivo, tal interação entre as fibras e a matriz cimentícia é denominada de mecanismo de ponte (Löfgren, 2005).

Muitos estudos têm sido feitos nos últimos anos sobre o concreto reforçado com fibra a depender da aplicação em que se deseja utilizá-lo, e hoje temos diversos casos desde o uso do concreto convencional reforçado com fibras até o uso de fibras em concretos de ultra alta performance (Fédération internationale du béton. et al., 2010).

Uma aplicação do uso do concreto que vem crescendo é o pavimento de concreto de cimento Portland, apesar do histórico brasileiro negativo com relação a esta tecnologia. Por conta dessa realidade, nos últimos anos houve um avanço tecnológico com o intuito de melhorar o desempenho mecânico do material, estudos para melhorar o controle tecnológico e até mesmo a maneira de produção. Destacam-se as vantagens do pavimento rígido que apresenta maior durabilidade em relação ao pavimento flexível (expectativa de 20 anos quando bem executado). Não sofre deformação plástica, além do fato de ser um pavimento claro e proporcionar maior visibilidade ao condutor.

Dentre as fibras mais usadas, tem-se a fibra de aço, fibra de polipropileno (PP), fibra de vidro e a fibra de PVA. Para que modificações nas características do composto como aumento ou



Valeria Cristina de Faria,
Artur Teixeira Herculano,
Claudia Azevedo Pereira,
Rodrigo Maziero Folgado,
Eriadi Sumodjo

manutenção da resistência à tração e tenacidade sejam eficientes, as características da fibra, como formato e dimensão além dos teores usados como reforço são pontos importantes a serem levados em conta. O uso das fibras ganhou tal relevância que em 2021 foi publicada a norma ABNT NBR 16940:2021.

A fibra de PVA apresenta propriedades interessantes, como o alto módulo, baixo alongamento, alta resistência à tração, resistência alcalina e ancoragem química, podendo ser usada em aplicações estruturais como é o caso de pavimentos de concreto.

O objetivo deste trabalho foi construir um trecho experimental para avaliar a trabalhabilidade do concreto com a fibra de PVA e com o auxílio do laboratório avaliar as propriedades mecânicas deste composto.

MATERIAIS E MÉTODOS

Antes da construção da Praça de Pedágio (P-05) entre Inocência e Três Lagoas no km 64 da rodovia MS-112 no Estado do Mato Grosso do Sul, foram feitos estudos preliminares em dois laboratórios para avaliar as características do compósito. Foram realizados ensaios de tração na flexão de acordo com a norma EN 14651 / NBR 16940 em corpos de prova prismáticos moldados pelo laboratório Holanda Engenharia e ensaiados pelo Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil da PUC Rio (LEME-DEC).

As características dos traços utilizados pelo laboratório Holanda Engenharia e pela obra são apresentados na Tabela 1. Nos trechos reforçados com fibra de PVA na obra não foram utilizadas fibras de PP, esta foi a única diferença na dosagem. A Figura 1 apresenta a praça de pedágio em análise sendo concretada.



Figura 1 – Praça de pedágio (AUTOR, 2023).



DOI: 10.29327/1430212.49-50

ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO USO DA FIBRA DE PVA EM PAVIMENTO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Tabela 1 – Características dos traços utilizados no laboratório Holanda Engenharia e na obra (AUTOR, 2023).

Traço	Cimento CPV ARI – RS	Brita	Pedrisco	Areia Média	Microfibra PP	Fibra de PVA	Aditivo Polifuncional	Água	Fck	Slump	Brita	a/c
	kg	kg	kg	kg	kg/m ³	kg/m ³	kg	l	MPa	cm	mm	
Holanda 1	379	512	512	723	0	6	1,896	173	36,6	21±4	-	0,46
Holanda 2	378	510	510	721	0	8	1,889	179	36,6	17±4	-	0,47
Padrão da obra (PP)	360	872	155	825	0,3	0	3,06	155	40	10±2	16 + 9	0,43
Trecho Experimental (PVA)	360	872	155	825	0	5	3,06	155	40	10±2	16 + 9	0,43

No traço da obra, foram utilizados os aditivos: Polifuncional MPH 130 e Sílica ativa (6% de cimento) 21,60 kg/m³. E no traço realizado pela Holanda, foi utilizado Sikaplast 950 Floor.

As características das fibras de PVA disponíveis são apresentadas conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades dos diferentes grades da fibra de PVA (KURARAY, 2023).

Grade	RMS702	RSC15	RECD15	RECS100L	RF400	RF400H	RFD400H	RF4000
Espessura (dtex)	7,0	15,0	15,0	100	400	400	400	4444
Diâmetro (µm)	27	38	38	100	200	200	200	660
Comprimento (mm)	6,0	8,0	8,0	12,0	6,0	12,0	18,0	30,0
Resistência à tração (MPa)	1790	1430	1560	1230	1100	1400	1400	850
Módulo (Gpa)	45	36	41	28	27	33	33	23
Alongamento na ruptura (%)	5,8	6,5	6,5	12,5	9,0	7,3	7,3	9,0

Na Tabela 3, são apresentadas as propriedades do grade usado.



Valeria Cristina de Faria,
Artur Teixeira Herculano,
Claudia Azevedo Pereira,
Rodrigo Maziero Folgado,
Eriadi Sumodjo

Tabela 3 – Propriedades da fibra de PVA (KURARAY, 2023).

Tipo	Diâmetro	Comprimento	Resistência à tração	Alongamento na ruptura	Módulo de Young
	µm	mm	MPa	%	Gpa
Kuralon™ RF4000X30	660	30	850	9	23

Na pesquisa realizada no laboratório da Holanda os corpos de prova moldados para realização de ensaios de resistência à compressão foram rompidos aos 28 dias com teores de fibra de 6 e 8 kg/m³. Antes da realização da obra também foram moldados corpos de prova, com teores de 3, 5 e 8 kg/m³, com o objetivo de avaliar a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas do concreto através de ensaios de resistência à compressão e definir um teor para a execução do trecho experimental. Ambos os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Ensaio de resistência à compressão realizado pela Holanda e construtora (AUTOR, 2023).

Traço Fck 40 – Ensaio de Resistência à Compressão (MPa)				
Laboratório		7 dias	14 dias	28 dias
Holanda	6 kg/m ³	-	-	45,0
Holanda	8 kg/m ³	-	-	46,6
PP (referência)	5 kg/m ³	36,40	39,45	-
Laboratório	3 kg/m ³	34,68	39,15	-
Laboratório	5 kg/m ³	34,53	39,16	-
Laboratório	8 kg/m ³	32,84	38,78	42,11

Decidiu-se utilizar a dosagem de 5 kg/m³ devido a melhor trabalhabilidade.

Como complemento são apresentados também os resultados de ensaios realizados na PUC Rio de tração na flexão conforme a Figura 2. O primeiro gráfico se refere a amostras com adição de 6 kg/m³ de fibras de PVA e o segundo gráfico com 8 kg/m³ (Souza, 2023).

Para os ensaios de flexão em três pontos realizados para a caracterização dos concretos reforçados com fibra (CRF) foi possível verificar o comportamento deflection softening, caracterizado por um abrandamento nas tensões resistidas após a abertura da primeira fissura, em todos os compósitos testados e, ganhos em tensão residual e tenacidade com o acréscimo da fração volumétrica de fibras concluindo que as fibras realizaram pontes de transferência de tensão através da fissura (Souza, 2023).



DOI: 10.29327/1430212.49-50

ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO USO DA FIBRA DE PVA EM PAVIMENTO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

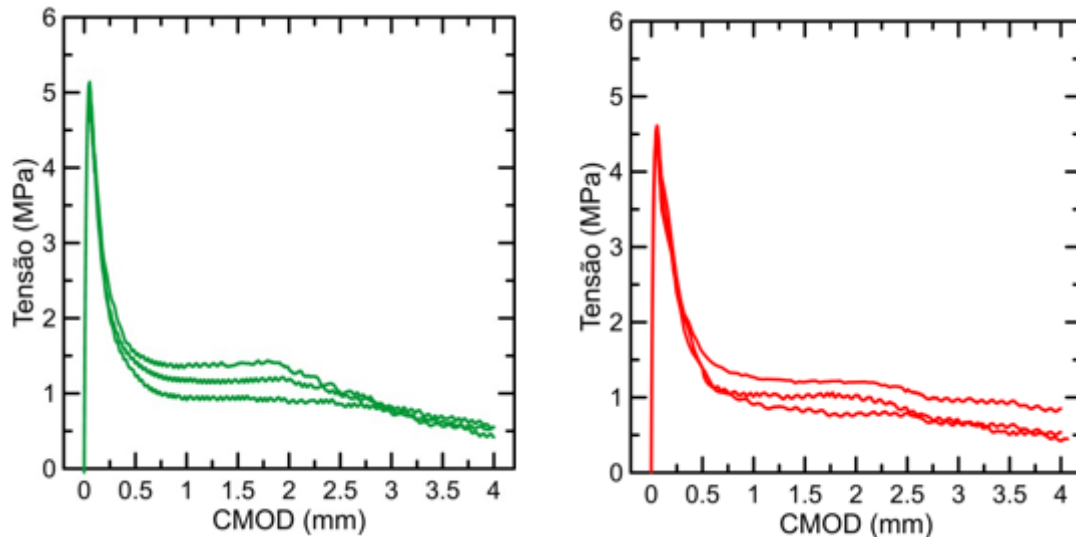


Figura 2 – Curvas tensão x abertura de fissura resultantes dos ensaios à flexão em três pontos (SOUZA, 2023).

DADOS DA CONCRETAGEM

A Noromix foi responsável pelo fornecimento do concreto no dia da obra realizada, em 2 de dezembro de 2023.

Os materiais foram adicionados na seguinte ordem: 8 toneladas de agregado + 2 toneladas de cimento + fibras de PVA + água, misturados por alguns minutos. Posteriormente, 800 kg de cimento mais o restante dos materiais. Devido a distância de 87 km entre obra e concreteira, foram adicionados 2,5 litros de retardador (2h30min de tempo adicional). O material foi misturado a uma velocidade de 16 rpm até o momento de envio e 1 rpm durante o trajeto até o canteiro de obras.

Durante a obra, foi feito o controle tecnológico pela construtora. Os ensaios são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Ensaio de resistência à compressão feito pela construtora (CONSTRUTORA KTS, 2023).

Placa do Caminhão	Data Moldagem	Data ruptura	Slump obra (cm)	Idade (dias)	Carga (ton)	Resistência (Mpa)
FZK-7G95	02/12/2023	09/12/2023	12	7	21,5	27,4
FZK-7G95	02/12/2023	30/12/2023	12	28	28,7	36,5



Valeria Cristina de Faria,
Artur Teixeira Herculano,
Claudia Azevedo Pereira,
Rodrigo Maziero Folgado,
Eriadi Sumodjo



Figura 3 – Corpos de prova moldados pela construtora.



Figura 4 - Corpos de prova moldados pela WAY-112 no local da obra.

Foram produzidos 3 caminhões de concreto de 8 m³ com 5 kg/m³ de fibra PVA (24 m³ de concreto) utilizados para concretar uma faixa de rolamento.

Ordem de chegada dos caminhões: 4 caminhões com fibra PP, 2 caminhões com fibra PVA, 2 caminhões com fibra PP, 1 caminhão com fibra PVA e 2 caminhões com fibra PP.

A faixa foi construída com 3,5 m de largura e 0,35 m de espessura, totalizando 13 m de comprimento no primeiro segmento e 6,5 m no segundo, aproximadamente. Vale ressaltar que houve uma mistura dos concretos, criando quatro interfaces com mistura das duas fibras.



DOI: 10.29327/1430212.49-50

ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO USO DA FIBRA DE PVA EM PAVIMENTO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

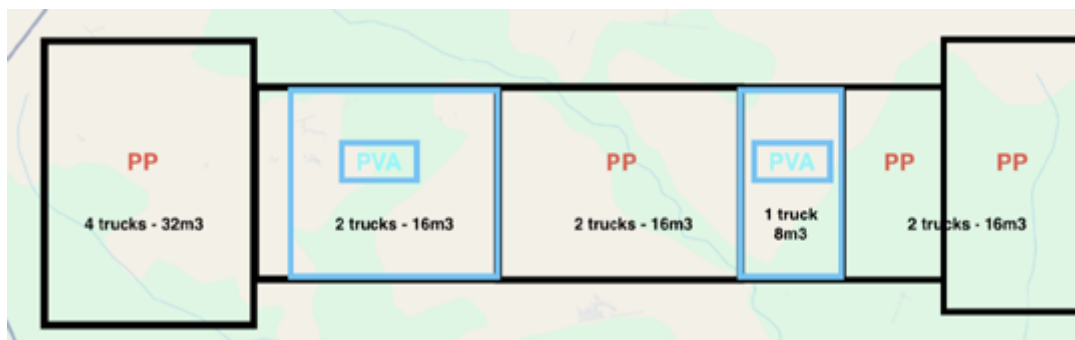


Figura 5 – Configuração final das fibras na pista da praça de pedágio.

Foram realizados testes de slump após a chegada dos caminhões na obra, conforme apresentados abaixo:

Especificação do projeto do slump: 10 ± 2 cm.

- 1º caminhão: 8,0 cm – Adicionados 40 litros de água para atingir a especificação.
- 2º caminhão: 11,0 cm (sem qualquer adição).
- 3º caminhão: 12,0 cm (sem qualquer adição).



Figura 6 – Slump do concreto com fibra de PVA proveniente do segundo caminhão.

A penúltima etapa é o vassouramento, que foi feito aproximadamente 20 minutos após a concretagem. A última etapa é o corte das juntas (onde estão posicionadas as barras de transferência), que ocorre entre 8 a 12 horas após a finalização da concretagem, a depender do processo de cura do concreto.



Valeria Cristina de Faria,
Artur Teixeira Herculano,
Claudia Azevedo Pereira,
Rodrigo Maziero Folgado,
Eriadi Sumodjo



Figura 7 – Momento do vassouramento em uma parte do pavimento.



Figura 8 – Aspecto do pavimento após finalização do vassouramento.



[DOI: 10.29327/1430212.49-50](https://doi.org/10.29327/1430212.49-50)

ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO USO DA FIBRA DE PVA EM PAVIMENTO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND



Figura 9 – Detalhe do corte da junta.

Uma segunda visita foi realizada no dia 13 de dezembro de 2023 e observou-se que o concreto com fibra de PVA se manteve íntegro.

CONCLUSÃO

Com a construção do trecho experimental, foi possível observar que a fibra de PVA não afetou a trabalhabilidade do concreto medido através do abatimento do tronco do cone, que teve alteração mínima com a adição da fibra de PVA. Houve uma boa homogeneidade, sem formação de ouriços e o resultado do vassouramento foi adequado mesmo com a presença de fibras, que também não afloraram, como ocorre com a fibra de aço. Essas eram algumas das preocupações da construtora, visto que a quantidade de fibra na dosagem padrão era bem inferior à quantidade de fibra de PVA escolhida.

Além disso, foi verificado nos ensaios realizados pela PUC-Rio que a fibra ajuda na resistência residual à tração na flexão do concreto (Souza, 2023).

Após duas semanas da construção do trecho, foi realizada uma vistoria para avaliar o pavimento de concreto nos segmentos reforçados com a fibra de PVA. Foi avaliado o acabamento, a texturização da superfície e o corte das juntas, que foram executadas sem qualquer problema, constatando conformidade em todos os aspectos.

É de extrema importância que novos trechos de pavimento sejam executados a fim de complementar o estudo com mais informações sobre os benefícios que a fibra pode acrescentar nas propriedades mecânicas do concreto, iniciado no trabalho de mestrado sobre a avaliação do uso da fibra de PVA em pavimentos aeroportuários no Brasil (Souza, 2023).

Dois trabalhos de mestrado estão sendo conduzidos no ITA, ambos abordando o tema do uso da fibra de PVA em pavimentos de concreto para aeroportos da região Amazônica. Esses estudos irão



Valeria Cristina de Faria,
Artur Teixeira Herculano,
Claudia Azevedo Pereira,
Rodrigo Maziero Folgado,
Eriadi Sumodjo

comparar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos normais e concretos reforçados com fibra de PVA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 16935:2021 - Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras - Procedimento 2021.

ABNT NBR 16940. Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio, 2021.

Alsaif, A., Garcia, R., Figueiredo, F. P., Neocleous, K., Christofe, A., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2019). Fatigue performance of flexible steel fibre reinforced rubberised concrete pavements. *Engineering Structures*, *193*, 170–183. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.040>

BALBO, J. T. Pavimentos de Concreto. Oficina de Textos, São Paulo, 2009.

Carlesso, D. M., de la Fuente, A., & Cavalaro, S. H. P. (2019). Fatigue of cracked high performance fiber reinforced concrete subjected to bending. *Construction and Building Materials*, *220*, 444–455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.038>

Daneshfar, M., Hassani, A., Aliha, M. R. M., Sadowski, T., & Karimi, A. (2023). Experimental Model for Study of Thickness Effect on Flexural Fatigue Life of Macro-Synthetic-Fiber-Reinforced Concretes. *Buildings*, *13*(3). <https://doi.org/10.3390/buildings13030642>

Enrenbring, Hinoel. Comportamento de concretos reforçados com microfibras de Polipropileno (PP), Álcool polivinílico (PVA), e recicladas de Poliéster (POL) em relação à retração por secagem restringida e às propriedades mecânicas. UNISINOS, São Leopoldo, 2017.

Federal Aviation Administration. Airport Pavement Design and Evaluation. Aviation 2009;1:1–2.

Fédération internationale du béton., Comité euro-international du béton., & Fédération internationale de la précontrainte. (2010). *Model code 2010 : first complete draft.*

Graeff, A. G., Pilakoutas, K., Neocleous, K., & Peres, M. V. N. N. (2012). Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. *Engineering Structures*, *45*, 385–395. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.030>

Lau, C. K., Chegenizadeh, A., Htut, T. N. S., & Nikraz, H. (2020). Performance of the steel fibre reinforced rigid concrete pavement in fatigue. *Buildings*, *10*(10), 1–18. <https://doi.org/10.3390/buildings10100186>

Leite, J. dos S., Santo, J. N. S. do E., Dos Santos, L. H. R., Guedes, D. T. da S., & Tapajós, L. S. (2023). Análise da resistência à flexão em vigas de concreto reforçado com fibras de aço. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, *16*(10), 21947–21968. <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.10-193>

Löfgren, I. (2005). *Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction-a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis.*



[DOI: 10.29327/1430212.49-50](https://doi.org/10.29327/1430212.49-50)

ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO USO DA FIBRA DE PVA EM PAVIMENTO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: microstructure, properties, and materials. 3rd. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Publishing, 2006.

Noushini, A., Samali, B., & Vessalas, K. (2013). Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.035>

Souza, F. Concreto reforçado com fibras de PVA aplicado a pavimentos aeroportuários: propriedades mecânicas e dimensionamento. PUC Rio, Rio de Janeiro, 2021.

Souza, F. R., Lima, V. N., Cerqueira, N. R. de A., Cardoso, D. C. T., & Silva, F. de A. (2023). Flexural behavior of PVA and PP fiber-reinforced concrete under cyclic loading. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(9). <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04382-9>

Zhang, J., Stang, H., & Li, V. C. (1999). Fatigue life prediction of fiber reinforced concrete under flexural load. In *International Journal of Fatigue* (Vol. 21). www.elsevier.com/locate/ijfatigue

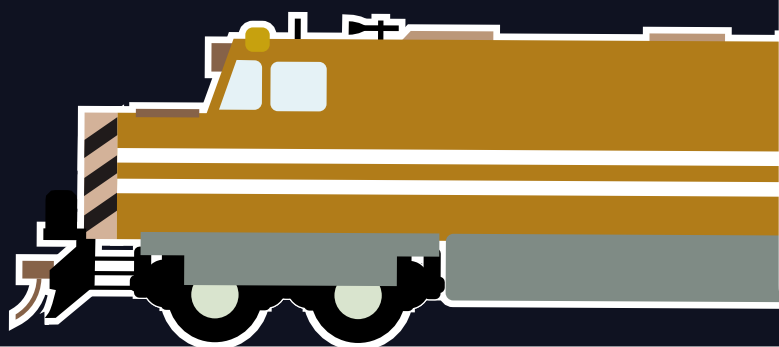


26º Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br



ABDER



**INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA
E SUSTENTABILIDADE:
MONITORAMENTO, RESILIÊNCIA
E IMPACTOS CLIMÁTICOS**

PROGRAMAÇÃO
TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS E ESTUDOS DE CASOS DE OBRAS
Quinta-feira, 22 de agosto

SALA PIRAMBU		
INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA E SUSTENTABILIDADE: MONITORAMENTO, RESILIÊNCIA E IMPACTOS CLIMÁTICOS (ST11)		
⌚ 09:00	EC719	ANÁLISE DE DADOS REFERENTES AO CRESCIMENTO DE VEGETAÇÃO PARA DEFINIÇÃO DE SERVIÇO DE ROÇADA
⌚ 09:20	TT859	"APLICAÇÃO DE GEORREFERENCIAMENTO EM DESAPROPRIAÇÕES E GERENCIAMENTO DE FAIXAS DE DOMÍNIO NO DER/DF: EFICIÊNCIA E SEGURANÇA VIÁRIA"
⌚ 09:40	TT916	MONITORAMENTO DA MASTOFAUNA: UMA FERRAMENTA AUXILIAR PARA TOMADA DE DECISÕES VISANDO A IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO EM RODOVIAS
⌚ 10:20	TT919	SENSORIAMENTO REMOTO COMO SUPORTE À DEFINIÇÃO DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS
⌚ 10:40	TT978	DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO COMO ESTRATÉGIA DE GOVERNANÇA DE DADOS NO SETOR DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA NO BRASIL
⌚ 11:00	TT214	FERRAMENTA DE INFRAESTRUTURAS RESILIENTES: PLANEJAMENTO E MONITORAMENTO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS
⌚ 11:20	TT096	RESILIÊNCIA DA INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA: ESTUDO DE CASO DA PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM TALUDES COM AS METODOLOGIAS GUT E AHP FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS
⌚ 11:40	EC599	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS POSSÍVEIS IMPACTOS DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE CASO DA MALHA DA CCR VIASUL
⌚ 12:00	TT344	ANÁLISE DOS EFEITOS DO CLIMA, DO TRÁFEGO E DO TIPO DE MISTURA NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS



ANÁLISE DE DADOS REFERENTES AO CRESCIMENTO DE VEGETAÇÃO PARA DEFINIÇÃO DE SERVIÇO DE ROÇADA

Gabriela Gomes de Carvalho Medrado¹; Fábio de Souza²; Kleber Deleon de Oliveira²

RESUMO

A análise de dados referentes ao crescimento de vegetação é essencial para determinar de maneira mais precisa o quantitativo de serviço de roçada em um contrato de conservação de faixa de domínio. A partir disso, é possível referenciar qual é a demanda das áreas em questão para futuros contratos de conservação, de modo que o serviço a ser executado atenda às normas técnicas e garanta a segurança dos usuários da via. Dessa forma, cabe a este trabalho analisar o crescimento da vegetação comparando os resultados obtidos através da utilização de dois tipos de ciclos/ano pré-determinados, sendo o primeiro a estimativa de 9 ciclos/ano, utilizado pelo DER/PR desde 2012, e a segunda, a estimativa de 6 ciclos/ano, que advém da Norma DNIT/182/2018 para indicar qual atende de maneira mais eficaz a demanda de roçada das áreas gerenciadas pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER/PR), Escritório Regional Caiuá (ERCaiuí), de acordo com o Sistema Rodoviário Estadual de 2022. E por fim, estimular a adoção deste método de pesquisa para as demais regiões do Estado do Paraná, para que as suas particularidades sejam levantadas e analisadas, e, por consequência, seja possível formar novos contratos de conservação de faixa de domínio mais adequados às necessidades de cada região, bem como o gerenciado assertivo do volume de serviço preestabelecido.

PALAVRAS-CHAVE: Rodovias; Conservação de Faixa de Domínio; Roçada; Conservação Corretiva Rotineira; Segurança Viária.

ABSTRACT

Analyzing data on vegetation growth is essential to determine more precisely the amount of mowing services required in a domain strip conservation contract. From this, it is possible to determine the demand for the areas in question for future conservation contracts. So that the service to be carried out complies with technical standards and guarantees the safety of road users. It is therefore the responsibility of this study to analyze vegetation growth by comparing the results obtained using two types of predetermined cycles/year, the first being the estimate of 9 cycles/year used by the DER/PR since 2012 and the second, the estimate of 6 cycles/year that comes from the DNIT/182/2018 Standard, in order to indicate which most effectively meets the demand for mowing in the areas managed by the Paraná Department of Highways (DER/PR), Caiuá Regional Office (ERCaiuí), according to the 2022 State Highway System. And finally, to encourage the adoption of this research method for the other regions of the State of Paraná so that their particularities can be surveyed and analyzed, and consequently, it will be possible to form new contracts more suited to the needs of each region as well as the assertive management of the volume of service already pre-established.

KEY WORDS: Highway; Domain Strip Conservation; Mowing; Routine Corrective Conservation; Road Safety.

¹ Afiliação, e-mail: Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), RESTEC POP, e-mail: gomes_gabriela@hotmail.com

² Afiliação, e-mail: Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER/PR), e-mail: fabiodesouza@der.pr.gov.br; kleberdeleon@der.pr.gov.br



DOI: [10.29327/1430212.49-17](https://doi.org/10.29327/1430212.49-17)

ANÁLISE DE DADOS REFERENTES AO CRESCIMENTO DE VEGETAÇÃO
PARA DEFINIÇÃO DE SERVIÇO DE ROÇADA

INTRODUÇÃO

O setor de infraestrutura e logística de transportes é de extrema importância para o desenvolvimento de um país, pois, de modo geral, esse setor é responsável pelo deslocamento de produtos e pessoas. Tal destaque requer que este setor tenha uma estrutura cada vez mais organizada.

De acordo com DNIT (2005), o modal hoje amplamente utilizado no Brasil pela população para todo e qualquer tipo de deslocamento são as rodovias, já que possuem maior abrangência nacional, sendo isso resultado de inúmeros investimentos realizados no passado para a expansão da malha rodoviária. Entretanto, expõe que atualmente o sistema rodoviário tem seus sinais de exaustão acentuados, aumentando a necessidade da execução de serviços de conservação.

Os serviços de conservação são executados na faixa de domínio, que são, de acordo com o Código Brasileiro de Trânsito (2009, p. 102), “superfície lideira às vias rurais, delimitada por lei específica e sob-responsabilidade do órgão ou entidade de trânsito competente com circunscrição sobre a via”. Ou seja, é a área na qual está instalada a rodovia e seus espaços laterais que pertencem ao patrimônio público.

Tais serviços de conservação são descritos como sendo um “conjunto de funções e atividades destinadas a proporcionar conforto e segurança aos usuários” (DNIT, 2005, p. 99). Contudo, é necessário que seja feito um levantamento detalhado acerca desses serviços e suas respectivas quantidades, atentando-se às microrregiões que existem em todo o país.

Neste sentido o estudo foi desenvolvido na microrregião de Paranavaí em faixa de domínio das rodovias estaduais do Paraná que são de responsabilidade do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER/PR) pertencente ao Escritório Regional Caiuá (ERCAIUÁ) este está vinculado a Superintendência Regional Noroeste (SRNOROE).

Portanto, o estudo foi realizado a partir do embasamento epistemológico que traz em seu bojo uma abordagem quantitativa e natureza aplicada visando demonstrar a quantidade de ciclos para roçada nas faixas de domínio das rodovias estaduais que são supervisionadas pela Superintendência Regional Noroeste (SRNOROE) e mais precisamente as gerenciadas pelo Escritório Regional Caiuá (ERCAIUÁ) que integram às áreas 04, 07 e 09.

Este estudo tem como objetivo apresentar uma estimativa de quantidade de ciclos para a execução do serviço de roçada nas áreas 04, 07 e 09 com base na análise de campo quanto ao crescimento da vegetação a fim de que estas informações sirvam de subsídios para a composição de futuros contratos de conservação de faixa de domínio. Neste estudo foi possível verificar que o período de Janeiro a Maio de 2024 nas áreas 04, 07 e 09 apresentou crescimento vegetativo significativo, destaque para o capim colônia (*Panicum Maximum*).

METODOLOGIA

O estudo foi realizado por meio do embasamento teórico, com abordagem quantitativa por meio da pesquisa aplicada, baseado na comparação dos resultados obtidos através de duas estimativas de ciclos/ano para o serviço de roçada, sendo a primeira estimativa de 9 ciclos/ano, que é adotada pelo DER/PR desde 2012, e a segunda estimativa de 6 ciclos/ano, que advém da Norma DNIT 182/2018 – PRO.

Segundo Manual de Conservação Rodoviária (DNIT, 2005), “A conservação rodoviária compreende o conjunto de operações rotineiras, periódicas e de emergência realizada com o objetivo de preservar as características técnicas e físico-operacionais do sistema rodoviário”. Desta



forma, os serviços de conservação das rodovias têm a principal funcionalidade de garantir a segurança e o conforto dos usuários da via.

Estes serviços de conservação são direcionados em função dos aspectos físicos do sistema rodoviário, no qual são bem diversificados e são classificados em 5 grupos de macroatividades, em razão da sua aplicação e natureza. Esses 5 grupos são: Conservação Corretiva Rotineira, Conservação Preventiva Periódica, Conservação de Emergência, Restauração e Melhoramentos (DNIT, 2017).

Conforme DNIT (2005), a conservação corretiva rotineira “É o conjunto de operações de conservação realizadas com objetivo de reparar um defeito e restabelecer o funcionamento do componente da rodovia, garantindo conforto e segurança aos usuários”.

O serviço de roçada se enquadra a conservação corretiva rotineira que é realizada por meio do corte da vegetação de pequeno porte presente na faixa de domínio. Este serviço tem como objetivo recompor a visibilidade da via, garantindo assim uma maior segurança aos usuários (DNIT, 2017).

O estudo para compor o serviço de roçada compreendeu na primeira etapa a demarcação de trechos para a coleta dos dados nas áreas 04, 07 e 09 representados nas figuras 1, 2 e 3 respectivamente. E na segunda etapa realizou-se a medida de crescimento da vegetação com 30 dias, correspondente a periodicidade de 9 ciclos/ano adotada pelo DER, e a medida do crescimento da vegetação com 60 dias, correspondente a periodicidade de 6 ciclos que advém da Norma DNIT 182/2018 – PRO.



Figura 1. Trechos com pontos de análise na área 04 (SISTEMA RODOVIÁRIO ESTADUAL, 2022).



DOI: 10.29327/1430212.49-17

**ANÁLISE DE DADOS REFERENTES AO CRESCIMENTO DE VEGETAÇÃO
PARA DEFINIÇÃO DE SERVIÇO DE ROÇADA**

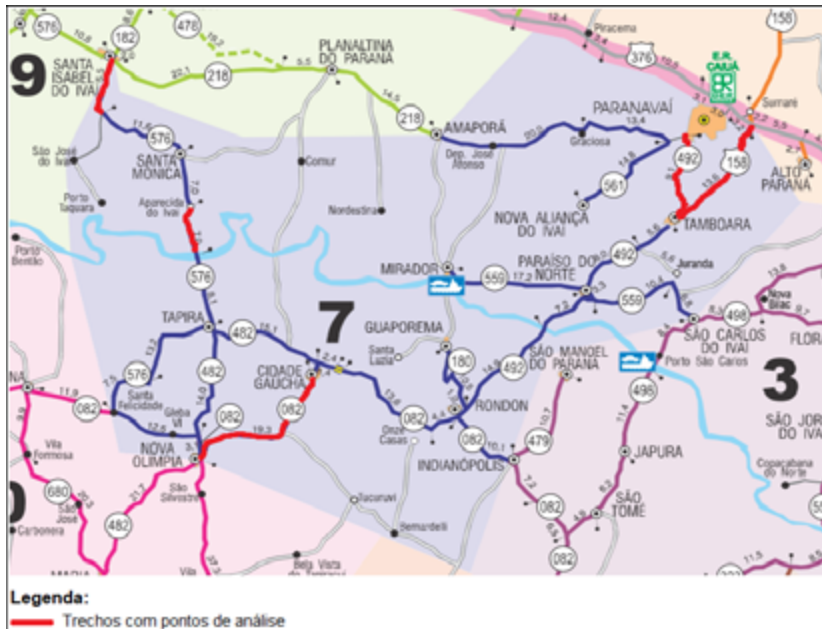


Figura 2. Trechos com pontos de análise na área 07 (SISTEMA RODOVIÁRIO ESTADUAL, 2022).

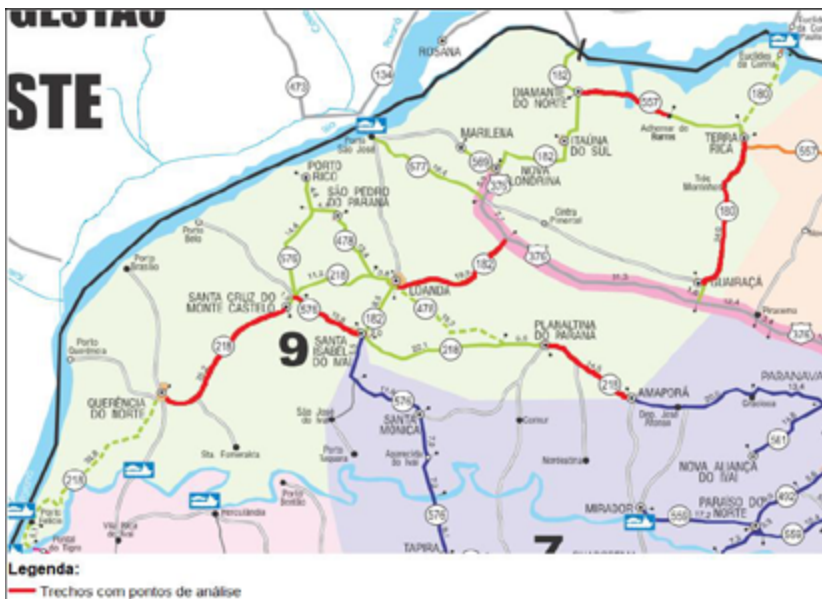


Figura 3. Trechos com pontos de análise na área 09 (SISTEMA RODOVIÁRIO ESTADUAL, 2022).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos levantamentos de campo nos pontos de estudo nas áreas 04, 07 e 09 que podem ser verificados nas figuras 1, 2 e 3. Bem como os fatores que influenciam no crescimento da vegetação, em especial as condições climáticas (precipitação). Foram obtidos os resultados do crescimento vegetativo nas faixas de domínio pertencem às rodovias estaduais de responsabilidade de gestão da Superintendência Regional Noroeste/Escritório Regional Caiuá.



De acordo com a figura 4, observa-se a taxa média de crescimento das vegetações na área 04, no período de 30 dias atingiu em média 0,68 metros de altura, e com 60 dias, atinge uma altura média de 1,37 metros. Sendo que na área 04 a maior pluviosidade ocorreu em Fevereiro e a menor em Março sendo observada na figura 5.

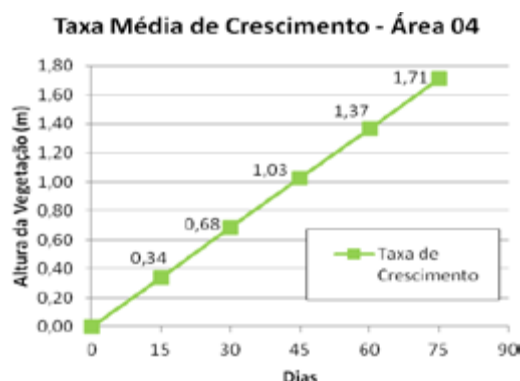


Figura 4. Média geral do crescimento da vegetação na Área 04 (AUTOR, 2024).

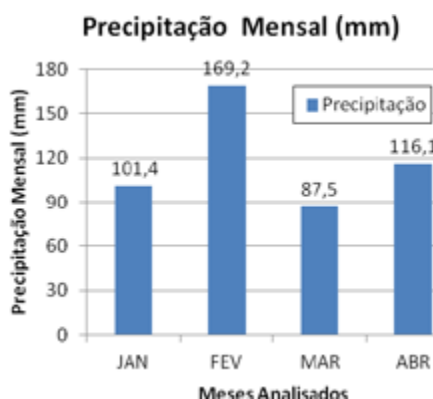


Figura 5. Altura mensal de precipitação na Área 04 (INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ, 2024).

Na área 07 (figura 6), a taxa média de crescimento da vegetação em 30 dias obteve uma altura média de 0,52 metros e em 60 dias atinge em média 1,04 metros de altura. Sendo que a maior pluviosidade ocorreu em Janeiro e a menor em Maio (figura 7).



DOI: 10.29327/1430212.49-17

ANÁLISE DE DADOS REFERENTES AO CRESCIMENTO DE VEGETAÇÃO
PARA DEFINIÇÃO DE SERVIÇO DE ROÇADA

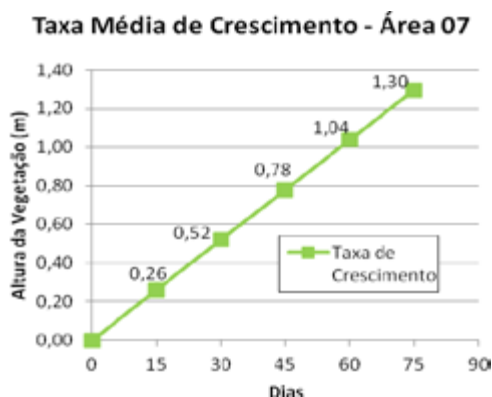


Figura 6. Média geral do crescimento da vegetação na Área 07 (AUTOR, 2024).

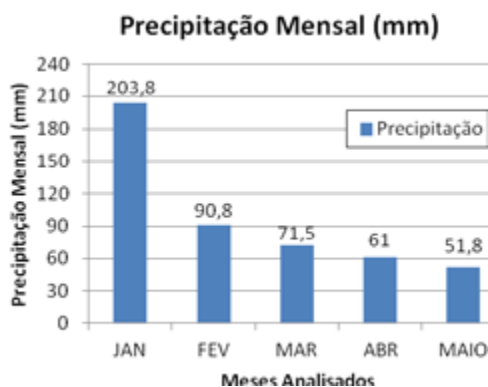


Figura 7. Altura mensal de precipitação na Área 07 (INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ, 2024).

Na área 09 (figura 8), é possível verificar que a taxa média de crescimento da vegetação em 30 dias atingiu em média uma altura de 0,54 metros, e com 60 dias a altura média é de 1,08 metros. Sendo que a maior pluviosidade ocorreu em Janeiro e a menor em Maio, isto pode ser observado na figura 9.

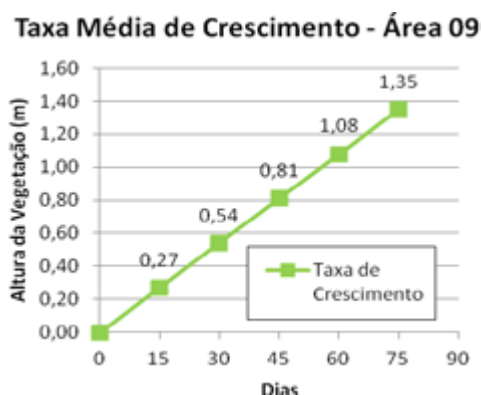


Figura 8. Média geral do crescimento da vegetação na Área 09 (AUTOR, 2024).



GABRIELA GOMES DE CARVALHO MEDRADO,
FÁBIO DE SOUZA,
KLEBER DELEON DE OLIVEIRA

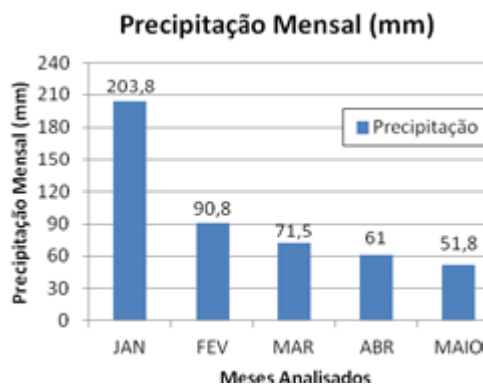


Figura 9. Altura mensal de precipitação na Área 09 (INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ, 2024).

As figuras 4, 6 e 8 demonstraram o crescimento da vegetação e as figuras 5, 7 e 9 as precipitações (pluviosidade) ocorridas no período do estudo. Nestas áreas foram identificadas em sua grande maioria a variedade *Panicum Maximum* (Capim Colômbio) e com menor ocorrência a variedade *Cynodon Nlemfuensis* (Grama-Estrela-Roxa). O capim colômbio é uma espécie originária da África Tropical e pode atingir cerca 3,0 metros de altura (OLIVEIRA *et al.*, 1995).

Outro ponto a respeito das regiões estudadas é de que as temperaturas máximas médias variaram entre 30°C e 35°C durante a execução do estudo de caso. Tais temperaturas foram registradas até mesmo no outono que se iniciou em Março, sendo as altas temperaturas um fator de influência no crescimento da vegetação.

No estudo o capim colômbio apresentou um crescimento médio rápido variando entre 1,37 e 1,04 metros (figuras 10 e 11) no período de 60 dias. Ainda observou-se que a área 04 apresentou uma distribuição pluviométrica sem grandes diferenças no período do estudo, enquanto as áreas 07 e 09 observou-se a irregularidade na distribuição.



Figura 10. Altura da Vegetação no KM 21+800 da PR 576 (AUTOR, 2024).



DOI: [10.29327/1430212.49-17](https://doi.org/10.29327/1430212.49-17)

ANÁLISE DE DADOS REFERENTES AO CRESCIMENTO DE VEGETAÇÃO PARA DEFINIÇÃO DE SERVIÇO DE ROÇADA



Figura 11. Altura da Vegetação no KM 540+200 da PR 082 (AUTOR, 2024).

Diante dos dados levantados em campo entende-se que a estimativa dos ciclos dos serviços de roçada estão intrínsecos à espécie e as condições climáticas de cada região. Sendo este serviço de suma importância para a segurança viária, pois a altura da vegetação pode afetar a visibilidade do trajeto da rodovia, principalmente em curvas, bem como também pode obstruir a visão do motorista em relação às placas de sinalização viária.

De acordo com DNIT (2010), o Manual de Sinalização Rodoviária aponta que para a sinalização vertical tem altura mínima de 1,20 metros medindo do bordo da pista até a face inferior da placa de sinalização.

Desta forma a divergência entre o número de ciclos de roçada estabelecido e demanda efetiva pode interferir na segurança dos usuários especialmente por afetar a visibilidade e isto pode ser observado, na rodovia PR 576, trecho Entr. PR 218 (Sta. Cruz do M. Castelo) – Sta. Isabel do Ivaí (A) onde a vegetação atingiu a altura de 1,40 (figura 10) metros na segunda leitura, que corresponde à periodicidade de 60 dias. Visto que altera a segurança viária e coloca em risco a vida dos usuários, o serviço de roçada deve ser analisado de modo detalhado para que não haja a inexecução do serviço ou sua execução irregular por quantidade inferior tratada em contrato.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo conclui a análise detalhada do crescimento da vegetação para a determinação dos ciclos do serviço de roçada que pertence ao grupo de conservação corretiva rotineira, que é de suma importância para a conservação da faixa de domínio, bem como a segurança do sistema rodoviário. Com base nas informações coletadas durante a pesquisa, pode-se constatar a necessidade da execução de 9 ciclos/ano, correspondente a periodicidade de 30 dias, servindo de base para o DER/PR manter a aplicabilidade da sua estimativa para a realização do serviço de roçada de maneira eficaz. Este estudo traz fundamentações essenciais para a elaboração de termo de



referência para futuros contratos de conservação de faixa de domínio, bem como um incentivo ao DER/PR e demais órgãos a desenvolver metodologias próprias visando atender com eficiência as suas necessidades e características no que envolve o serviço de roçada, como a sua real periodicidade levando em consideração as espécies de vegetação de maior incidência de crescimento, os aspectos climáticos (pluviosidade e temperatura) e edáficos (solos) de acordo com a região do contrato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. M. S. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Gramma-estrela-roxa: gramínea forrageira para diversificação de pastagens no acre. Rio Branco: Embrapa Acre, 2009. 83 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Conservação Rodoviária: IPR 70. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005. 564 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/710_manual_de_conservacao_rodoviaria.pdf. Acesso em: 27 mar. 2024.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de Sinalização Rodoviária. Brasília: Dnit, 2010. 412 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/operacoes-rodoviaras/faixa-de-dominio/regulamentacao-atual/743_manuaisinalizacaorodoviaria-30-04-2021.pdf. Acesso em: 15 mar. 2024.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manutenção e Conservação Rodoviária. Brasília: Dnit, 2017. 65 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/manuais-de-custos-de-infraestrutura-de-transportes/volume-10-manuais-tecnicos/conteudo-08-manutencao-e-conservacao-rodoviaria.rar/view. Acesso em: 4 mar. 2024.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 182/2018 - PRO: Conservação Rodoviária - Determinação do Nível de Esforço de Roçada – Procedimento. Rio de Janeiro: DNIT, 2018. 7 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/DNIT_182_2018_PRO.pdf. Acesso em: 11 mar. 2024

BRASÍLIA. Senado Federal. Código de Trânsito Brasileiro. 2. ed. Brasília: Subsecretaria de Edições Técnicas, 2009. 196 p. Disponível em: <https://www2.senado.leg.br/bdsf/handle/id/70315>. Acesso em: 22 mar. 2024.

OLIVEIRA, M. P. *et al.* Avaliação de Seis Cultivares de Capim Colíneo (*Panicum maximum* Jacq.) no Estado do Acre. 1995. 25 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Agrônoma, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 1995.

PARANÁ. Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística. Concorrência Pública n.º 025/2023, DER/DOP. Protocolo n.º 21.497.679-0 GMS n.º 85/2023 (CP). Anexo 01 – Termo de Referência. 2024. 199 p. Disponível em: <https://www.administracao.pr.gov.br/Compras/Pagina/Compras-Parana-Consulta-de-Editais-e-Licitacoes>. Acesso em: 10 abr. 2024.

PARANÁ. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística. Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná. Sinalização e Segurança Viária: Fornecimento e Implantação de Placas Laterais para Sinalização Vertical. Paraná: Governo do Estado do Paraná, 2022. 236 p. Disponível em: https://www.der.pr.gov.br/sites/der/arquivos_restritos/files/documento/2023-09/DER-ES-SV-09-23_Final.pdf. Acesso em: 25 fev. 2024.

PARANÁ. INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. Sistema de Informações Hidrológicas. 2024. Disponível em: <http://www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br/sih-web/gerarRelatorioAlturasDiariasPrecipitacao.do?action=carregarInterfaceInicial>. Acesso em: 17 maio 2024.

PARANÁ. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística. Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná. Sistema Rodoviário Estadual 2022. Paraná: Governo do Estado do Paraná, 2022. 236 p. Disponível em: <https://www.der.pr.gov.br/Pagina/Sistema-Rodoviario-Estadual>. Acesso em: 13 fev. 2024.



DOI: 10.29327/1430212.49-16

Aplicação de Georreferenciamento em Desapropriações e Gerenciamento de "APLICAÇÃO DE GEORREFERENCIAMENTO EM DESAPROPRIAÇÕES E GERENCIAMENTO DE FAIXAS DE DOMÍNIO NO DER/DF: EFICIÊNCIA E SEGURANÇA VIÁRIA"

JESUS MAURO VIEIRA DE OLIVEIRA¹; ANDREA AMAZILLES LOUSADA; BRUNO MAIA SORIANO LOUSADA; CAROLINE CHAHINI RIBEIRO;
JESUS MAURO VIEIRA DE OLIVEIRA¹; ANDREA AMAZILLES LOUSADA; BRUNO MAIA SORIANO LOUSADA; CAROLINE CHAHINI RIBEIRO;
JANDUHY PEREIRA DOS SANTOS; MAURÍCIO THEODÓSIO MATTOS MARQUES & RICARDO SAMESHIMA TABA
*SANTOS; MAURÍCIO THEODÓSIO MATTOS MARQUES & RICARDO SAMESHIMA
TABA*

RESUMO

Este artigo tem por finalidade explicar a relação entre a administração das faixas de domínio, os processos de desapropriação e o georreferenciamento, os quais são fundamentais para garantir a infraestrutura e a segurança viária. Inicialmente, abordaremos a definição e a importância das faixas de domínio dentro do contexto de um sistema rodoviário, destacando não apenas sua relevância, mas também a essencialidade de seu papel na preservação e na manutenção da infraestrutura de transporte, vital para o funcionamento adequado das vias.

Posteriormente, exploraremos o processo de desapropriação de áreas que estejam sofrendo ocupação ou interfiram com a faixa de domínio, analisando os meios legais disponíveis para a aquisição de terras privadas para uso público. Nesse contexto, é essencial ressaltar a importância da integridade das faixas de domínio e como os mecanismos legais visam garantir essa integridade.

Em seguida, discutiremos sobre o uso do georreferenciamento como uma ferramenta tecnológica essencial para a gestão eficiente dessas áreas. Essa tecnologia proporciona um mapeamento preciso e o monitoramento contínuo das faixas de domínio, facilitando a implementação de um gerenciamento eficiente e a identificação de possíveis problemas de forma ágil.

Por fim, abordaremos que vantagens o georreferenciamento traz para esta integração e para a melhoria dos processos de administração e fiscalização e, se ocorrer, desapropriação nas faixas de domínio. Destacaremos a otimização dos procedimentos administrativos e a garantia da segurança viária como resultados diretos dessa integração nas rodovias do Distrito Federal. É imperativo compreender e aplicar adequadamente esses conceitos para promover um sistema de transporte eficiente e seguro, beneficiando assim a sociedade como um todo.

PALAVRAS CHAVE : Faixa de Domínio; Georreferenciamento; Gerenciamento, Ocupação e Desapropriação.

¹ Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal – DER/DF: SAM Bloco C - Setor Complementares - Ed. Sede do DER/DF, Brasília – DF, 70.620.030, jesus.oliveira2@der.df.gov.br; andrea.lousada@der.df.gov.br; bruno.lousada@der.df.gov.br; caroline.ribeiro@der.df.gov.br; janduhysantos@der.df.gov.br; mauricio.marques@der.df.gov.br & ricardo.taba@der.df.gov.br.



JESUS MAURO VIEIRA DE OLIVEIRA,
ANDREA AMAZILES LOUSADA, BRUNO MAIA SORIANO LOUSADA,
CAROLINE CHAHINI RIBEIRO, JANDUHY PEREIRA DOS SANTOS,
MAURÍCIO THEODÓSIO MATTOS MARQUES & RICARDO SAMESHIMA TABA

ABSTRACT

This article aims to explain the relationship between the administration of right-of-way, expropriation processes and georeferencing, which are fundamental to ensuring infrastructure and road safety. Initially, we will address the definition and importance of right-of-way within the context of a highway system, highlighting not only their relevance, but also the essential role they play in preserving and maintaining transport infrastructure, vital for the proper functioning of roads.

Subsequently, we will explore the process of expropriation of areas that are being occupied or interfere with the right-of-way, analyzing the legal means available for acquiring private land for public use. In this context, it is essential to highlight the importance of the integrity of right-of-way and how legal mechanisms aim to guarantee this integrity.

Next, we will discuss the use of georeferencing as an essential technological tool for the efficient management of these areas. This technology provides precise mapping and continuous monitoring of right-of-way areas, facilitating the implementation of efficient management and the rapid identification of possible problems.

Finally, we will address what advantages georeferencing brings to this integration and to the improvement of administration and inspection processes and, if it occurs, expropriation in the right-of-way. We will highlight the optimization of administrative procedures and the guarantee of road safety as direct results of this integration on the highways of the Federal District. It is imperative to properly understand and apply these concepts to promote an efficient and safe transportation system, thus benefiting society as a whole.

KEYWORDS: Domain Range; Georeferencing; Management, Occupation and Expropriation.



DOI: [10.29327/1430212.49-16](https://doi.org/10.29327/1430212.49-16)

“APLICAÇÃO DE GEORREFERENCIAMENTO EM DESAPROPRIAÇÕES E GERENCIAMENTO DE FAIXAS DE DOMÍNIO NO DER/DF: EFICIÊNCIA E SEGURANÇA VIÁRIA”

INTRODUÇÃO

As faixas de domínio representam uma parte essencial da infraestrutura de transporte, desempenhando um papel fundamental na garantia da segurança viária e na manutenção adequada das vias. Essas áreas, também conhecidas como faixas de servidão, são reservadas para a implantação e operação de rodovias, ferrovias, dutos, entre outras estruturas de transporte, e desempenham um papel importante na proteção e preservação dessas infraestruturas vitais.

A importância das faixas de domínio reside na sua função de proporcionar espaço adicional para operações de construção, manutenção e expansão das vias de transporte. Além disso, essas áreas também servem como uma zona de segurança, protegendo as infraestruturas de transporte de interferências externas e proporcionando uma margem de segurança para a circulação de veículos.

Neste artigo, exploraremos a relação entre as faixas de domínio, a desapropriação e o georreferenciamento, destacando como esses elementos se entrelaçam na administração e fiscalização dessas áreas críticas. A desapropriação, processo legal pelo qual o Estado adquire terras privadas para uso público, desempenha um papel importante na criação e preservação das faixas de domínio, garantindo que o espaço necessário esteja disponível para a construção e manutenção das vias de transporte.

Ao mesmo tempo, o georreferenciamento emerge como uma ferramenta poderosa na gestão eficiente das faixas de domínio, permitindo o mapeamento preciso e detalhado dessas áreas e facilitando a monitorização contínua de sua utilização e condição. A integração dessas duas abordagens - desapropriação e georreferenciamento - apresenta-se como uma estratégia promissora para otimizar a administração e fiscalização das faixas de domínio, garantindo sua utilização eficaz e segura.

Nas próximas seções, examinaremos mais detalhadamente o processo de desapropriação, sua justificativa e implicações para a gestão das faixas de domínio, bem como a aplicação do georreferenciamento na administração e fiscalização dessas áreas. Ao final, destacaremos os benefícios e desafios associados à integração desses elementos, oferecendo insights valiosos para aprimorar a eficiência e segurança das faixas de domínio em todo o contexto da infraestrutura de transporte.

1. FAIXAS DE DOMÍNIO: DEFINIÇÃO, IMPORTÂNCIA E IMPORTÂNCIA

As faixas de domínio representam áreas, de bens de uso comum, estratégicas, reservadas e afetadas ao serviço público, para a implantação e manutenção de diferentes modalidades de infraestrutura de transporte, tais como rodovias, ferrovias e dutos. Estas áreas são delineadas ao longo dos traçados das vias de transporte e abrangem uma extensão lateral e, por vezes, também vertical, destinadas a assegurar espaço adequado para a operação, expansão e segurança das infraestruturas (Figura 1).

Por tratar-se de bem imóvel, a faixa de domínio adquire dimensão jurídica, possuindo características de ser impenhorável, inalienável, possuir imprescritibilidade e não onerosidade.



JESUS MAURO VIEIRA DE OLIVEIRA,
 ANDREA AMAZILES LOUSADA, BRUNO MAIA SORIANO LOUSADA,
 CAROLINE CHAHINI RIBEIRO, JANDUHY PEREIRA DOS SANTOS,
 MAURÍCIO THEODÓSIO MATTOS MARQUES & RICARDO SAMESHIMA TABA



Figura 1 - Representação de faixa de domínio e área non aedificandi. (ribrusque.com.br, 2024)

1.1 Área não edificável

A Lei Federal Nº 6.766/1973, estabelecia que deveria ser deixada uma faixa de 15 metros, de cada lado, ao longo das faixas de domínio das rodovias. Entretanto, a Lei Federal Nº 13.913/2019, trata da alteração na largura que, “poderá ser reduzida por lei municipal ou distrital que aprovar o instrumento do planejamento territorial, até o limite mínimo de 5 (cinco) metros de cada lado”. A faixa não edificável, não tem a mesma finalidade da faixa de domínio que é a segurança e operação, possuindo uma limitação administrativa, portanto, os órgãos fiscalizadores da via (DNIT e DER’s) não possuem competência para estabelecer e fiscalizar, cabendo ao município fazê-lo (Despacho nº 13/2021/GM/MINFRA):

“a) a responsabilidade pela fiscalização do respeito à faixa não edificável é incumbência do município, bem como a competência para legislar sobre sua ampliação para além do que determina o art. 4º, III, da Lei nº 6.766/1979, sendo de bom alvitre registrar que a faixa não edificável sempre respeitará os limites da faixa de domínio;

1.2 Faixas de Domínio no Distrito Federal

No Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER/DF), a Diretoria de Faixas de Domínio – (DIDOM) é responsável por prestar serviços que atendam aos anseios dos usuários, estabelecendo a interação entre o cidadão e o DER/DF, além de ter o objetivo de modernizar o processo dos serviços prestados.

As Rodovias e suas respectivas Faixas de Domínio, que estejam situadas no Distrito Federal, pertencem ao Estado (patrimônio público), e estão jurisdicionadas pelo DER/DF, conforme prevê a Lei nº 5.795/2016, ou seja, o DER/DF deve mantê-las conservadas e pode autorizar a utilização deste espaço, desde que de acordo com as normas existentes e sempre sob a sua fiscalização e o acompanhamento.

Para o Distrito Federal, a faixa de domínio têm sua configuração variada de acordo com cada rodovia, normatizados pelo Decreto nº 27.365/2006, e podem variar de 130 a 40 metros, divididos simetricamente em relação aos eixos dos canteiros centrais.

Para instalação de Engenheiros Publicitários na faixa de domínio das rodovias do SRDF ou mesmo ocupações, fixas ou móveis, deve-se ter a autorização do DER/DF, mediante a existência de Plano de Ocupação específico para o local sugerido.

Importante frisar que a não observância do todo supra citado, implica na remoção da ocupação por meio do uso do “desforço incontinenti” (falta de consistência nos argumentos para o uso do espaço



[DOI: 10.29327/1430212.49-16](https://doi.org/10.29327/1430212.49-16)

“APLICAÇÃO DE GEORREFERENCIAMENTO EM DESAPROPRIAÇÕES E GERENCIAMENTO DE FAIXAS DE DOMÍNIO NO DER/DF: EFICIÊNCIA E SEGURANÇA VIÁRIA”

da faixa de domínio,) em conformidade com o Art. 1.210 e seus parágrafos, do Código Civil Brasileiro – CC (Lei Federal nº 10.406/02).

1.3 Principais legislações sobre Faixas de Domínio no Distrito Federal

Decreto nº 19.577 de 8 de setembro de 1998

Fixa as faixas de domínio do Sistema Rodoviário do Distrito Federal – SRDF.

Decreto nº 27.365, de 1º de novembro de 2006

Altera o Sistema Rodoviário do Distrito Federal e dá outras providências

Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979

Dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências.

Lei nº 4257 de 02/12/2008

Estabelece critérios de utilização de áreas públicas do Distrito Federal por mobiliários urbanos do tipo quiosque e trailer para o exercício de atividades econômicas e dá outras providências.

Lei 3035 de 18/07/2002

Dispõe sobre o Plano Diretor de Publicidade das Regiões Administrativas do Plano Piloto – RA I, do Cruzeiro – RA XI, de Candangolândia – RA XVIX, Lago Sul – RA XVI e do Lago Norte – RA XVIII.

Lei nº 3.036, de 18 de julho de 2002

Dispõe sobre o Plano Diretor de Publicidade das Regiões Administrativas do Gama – RA II, Taguatinga – RA III, Brazlândia – RA IV, Sobradinho – RA V, Planaltina – RA VI, Paranoá – RA VII, Núcleo Bandeirante – RA VIII, Ceilândia – RA IX, Guará – RA X, Samambaia – RA XII, Santa Maria – RA XIII, São Sebastião – RA XIV, Recanto das Emas – RA XV e Riacho Fundo – RA XVII.

Decreto nº 28.134, de 12 de julho de 2007.

Regulamenta a Lei nº 3.035, de 18 de julho de 2002, que dispõe sobre o Plano Diretor de Publicidade das Regiões Administrativas do Plano Piloto-RA I, do Cruzeiro-RA XI, da Candangolândia-RA XIX, do Lago Sul-RA XVI, do Lago Norte-RA XVIII, e dá outras providências.

Decreto nº 29.413, de 20 de agosto 2008.

Regulamenta a Lei nº 3.036, de 18 de julho de 2002, e dá outras providências.

Lei nº 5.795, de 27 de dezembro de 2016

Dispõe sobre a administração, a exploração, a utilização e a fiscalização das faixas de domínio do Sistema Rodoviário do Distrito Federal e dá outras providências.

Decreto nº 38.546, de 10 de outubro de 2017

Aprova o regimento interno da Junta de Recursos da Faixa de Domínio do Departamento de Estradas de Rodagem e dá outras providências.



JESUS MAURO VIEIRA DE OLIVEIRA,
ANDREA AMAZILES LOUSADA, BRUNO MAIA SORIANO LOUSADA,
CAROLINE CHAHINI RIBEIRO, JANDUHY PEREIRA DOS SANTOS,
MAURÍCIO THEODÓSIO MATTOS MARQUES & RICARDO SAMESHIMA TABA

Lei nº 6.639, de 21 de julho de 2020

Altera a Lei nº 3.035, de 18 de julho de 2002, que dispõe sobre o Plano Diretor de Publicidade das Regiões Administrativas do Plano Piloto – RA I, do Cruzeiro – RA XI, de Candangolândia – RA XXIX, do Lago Sul – RA XVI e do Lago Norte – RA XVIII., que dispõe sobre o Plano Diretor de Publicidade das Regiões Administrativas do Plano Piloto – RA I, do Cruzeiro – RA XI, de Candangolândia – RA XXIX, do Lago Sul – RA XVI e do Lago Norte – RA XVIII.

Resolução nº 07/2021 DG/DNIT

Dispõe sobre o uso das faixas de domínio de rodovias federais sob circunscrição do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

Resolução nº 10/2020 DG/DNIT

Revoga a Súmula nº 01/2018 DG/DNIT, de 03 de julho de 2018, publicada no Diário Oficial da União em 05 de julho de 2018.

Decreto nº 84.398/1980

Dispõe sobre a ocupação de faixas de domínio de rodovias e de terrenos de domínio público e a travessia de hidrovias, rodovias e ferrovias, por linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição de energia elétrica e dá outras providências.

Decreto nº 86.859/1982

Altera o Decreto nº 84.398, de 16 de janeiro de 1980.

Lei nº 6.766/1979

Dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências.

Lei nº 10.932/2004

Altera o art. 4º da Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979.

2. DESAPROPRIAÇÃO: PROCESSO JURÍDICO E JUSTIFICATIVA

A desapropriação é um processo legal pelo qual o Estado adquire propriedades privadas para uso público, incluindo a construção e manutenção de faixas de domínio em projetos de infraestrutura viária. Esse processo é regido por legislações específicas em cada país, que estabelecem os procedimentos a serem seguidos, os critérios de avaliação e as garantias aos proprietários afetados. O vínculo jurídico de desapropriação tem fundamento na Constituição Federal, que no Título II, Capítulo I, Art. 5º, descreve:

.....
.....
XXIV - a lei estabelecerá o procedimento para desapropriação por necessidade ou utilidade pública, ou por interesse social, mediante justa e prévia indenização em dinheiro, ressalvados os casos previstos nesta Constituição;

As faixas de domínio, fundamentais para a operação segura e eficiente de infraestruturas viárias como rodovias e ferrovias, tradicionalmente envolviam a desapropriação de terras para sua criação e



DOI: [10.29327/1430212.49-16](https://doi.org/10.29327/1430212.49-16)

“APLICAÇÃO DE GEORREFERENCIAMENTO EM DESAPROPRIAÇÕES E GERENCIAMENTO DE FAIXAS DE DOMÍNIO NO DER/DF: EFICIÊNCIA E SEGURANÇA VIÁRIA”

manutenção. A desapropriação é um processo pelo qual o Estado adquire propriedades privadas para uso público. No entanto, atualmente, a definição das áreas marginais dessas faixas não depende mais exclusivamente desse processo.

2.1 Limitação administrativa de propriedade desapropriação

Hoje, as faixas de domínio possuem uma natureza jurídica de limitação administrativa. Isso significa que, ao invés de adquirir a propriedade, o Estado impõe restrições sobre o uso da terra ao longo das infraestruturas de transporte. O proprietário mantém a posse e o título da terra, mas deve seguir as restrições estabelecidas para garantir a segurança e a funcionalidade da infraestrutura pública. Essas limitações visam assegurar que o uso da terra dentro dessas áreas seja compatível com os objetivos de segurança viária e de manutenção da infraestrutura.

As faixas de domínio com limitação administrativa são regulamentadas por legislações específicas que definem claramente as restrições e os direitos dos proprietários. Esta abordagem permite uma gestão mais eficiente e econômica das áreas marginais, ao mesmo tempo em que protege os interesses públicos e privados.

2.2 Processo de desapropriação

O processo de desapropriação normalmente inicia-se com a declaração de utilidade pública, onde o Estado justifica a necessidade da aquisição da terra para a realização de um projeto de interesse coletivo, como a construção de uma rodovia ou ferrovia. Ela não é um procedimento, mas sim um ato estatal unilateral, pois a vontade do poder público se impõe à do proprietário do bem, que poderá apenas discordar do valor da desapropriação, mas não dela em si, podendo tal entrave ser resolvido na esfera judicial (JUSTEN FILHO, M. 2014).

A desapropriação é justificada pela necessidade de promover o desenvolvimento socioeconômico e a melhoria da infraestrutura de transporte. Em projetos viários, a aquisição de terras para a construção e manutenção de faixas de domínio é essencial para garantir a continuidade e segurança das vias, possibilitando a expansão e modernização da rede viária, bem como a implementação de medidas de segurança viária. É fundamental para resolver questões de acesso e conectividade, permitindo a interligação eficiente entre diferentes regiões e facilitando o transporte de pessoas e mercadorias.

Outra justificativa importante para a desapropriação em projetos de infraestrutura é a garantia da segurança viária, pois permite a implementação de medidas de segurança, como acostamentos, barreiras de proteção e áreas de escape, que contribuem para reduzir o risco de acidentes e garantir a integridade dos usuários da via.

No entanto, é importante que esse processo seja conduzido de forma transparente, respeitando os direitos dos proprietários afetados e buscando minimizar os impactos sociais e ambientais, sendo necessária a atuação de uma equipe multidisciplinar composta por engenheiro civil e/ou Agrimensor, advogados, assistente social, psicólogo, engenheiro agrônomo, topógrafos, pois são esses os profissionais que irão tratar com o terceiro para esclarecer a necessidade da desocupação da faixa de domínio.

Para se chegar ao consenso de uma desapropriação nem sempre o caminho é fácil, pois, envolve toda uma questão social e cultural onde há a necessidade da flexibilidade de ambas as partes e atuação de um cada envolvido no processo.



JESUS MAURO VIEIRA DE OLIVEIRA,
 ANDREA AMAZILES LOUSADA, BRUNO MAIA SORIANO LOUSADA,
 CAROLINE CHAHINI RIBEIRO, JANDUHY PEREIRA DOS SANTOS,
 MAURÍCIO THEODÓSIO MATTOS MARQUES & RICARDO SAMESHIMA TABA

Sendo constatado que a propriedade se encontra dentro da faixa de domínio, iniciam as tratativas junto ao terceiro para desocupar a faixa de domínio e as negociações para se chegar a um consenso do valor, a ser pago, que foram gastos nas benfeitorias existentes. Para se chegar ao valor de uma área a ser desapropriada é realizada pesquisa do valor do m² da região, o qual será incorporada ao laudo, de acordo com a avaliação dos bens e imóveis conforme as diretrizes contidas na NBR 14653.

A desapropriação, também, pode se originar de um decreto do Poder Executivo ou através da Lei nº 3.365/1941- que atesta a utilidade pública sobre determinado bem, podendo ser caracterizada como perda entre o bem particular-proprietário em favor do Estado, isso, em função dos princípios da supremacia de interesse público sobre a área privada, sendo recompensado pela justiça indenizatória (JUSBRASIL, Lei de Desapropriação). Portanto, a área ser desapropriada só será incorporada na Área da União após a Publicação de Portaria no Diário Oficial o qual necessita de um estudo específico (valor da área) e projeto próprio (Fig.2 - TEODORO, Roberto Leal; et. Al, 2018).

O STJ já assentou jurisprudência no sentido de que apenas o caput do art. 15 foi aceito pela Constituição Federal de 1988, fixando, que para emissão provisória na posse é indispensável a produção de laudo judicial de avaliação provisória, a fim de assegurar-se a justiça da indenização (DNIT ,2006), porém, o STF posiciona-se no sentido completamente oposto, em decisões antigas que talvez não mais reflitam o atual posicionamento do mesmo.

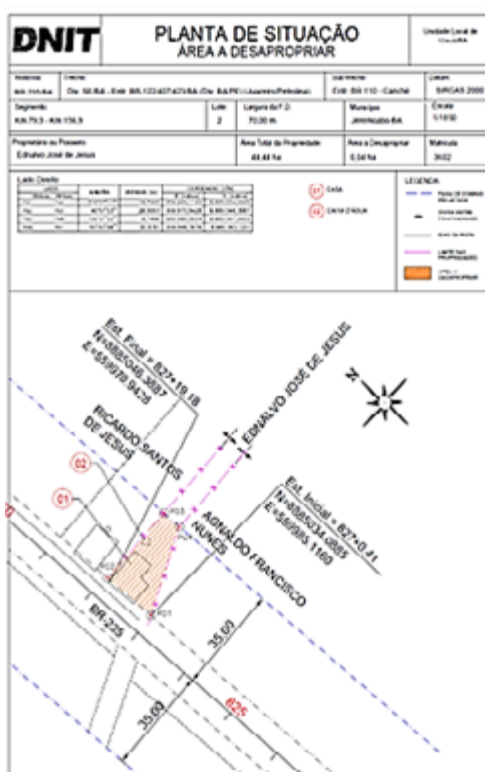


Figura 2 - Planta de área a ser desapropriada (TEODORO, Roberto Leal; et. Al, 2018)



DOI: [10.29327/1430212.49-16](https://doi.org/10.29327/1430212.49-16)

“APLICAÇÃO DE GEORREFERENCIAMENTO EM DESAPROPRIAÇÕES E GERENCIAMENTO DE FAIXAS DE DOMÍNIO NO DER/DF: EFICIÊNCIA E SEGURANÇA VIÁRIA”

3. GEORREFERENCIAMENTO DAS FAIXAS DE DOMÍNIO

3.1 Tecnologia para gestão eficiente

Uma tecnologia essencial para a gestão eficiente de diversas áreas, incluindo faixas de domínio em projetos de infraestrutura viária, é o georreferenciamento. Esse conceito baseia-se na utilização de tecnologias como GPS (Sistema de Posicionamento Global) e SIG (Sistemas de Informação Geográfica) para mapear e monitorar áreas de interesse, permitindo uma análise detalhada e precisa do espaço geográfico. Por meio do georreferenciamento, é possível atribuir coordenadas geográficas a pontos específicos do terreno, possibilitando sua localização exata em um mapa digital. Essa abordagem utiliza uma combinação de técnicas de sensoriamento remoto, levantamento topográfico e análise cartográfica para capturar e representar informações geoespaciais de forma precisa e detalhada.

A aplicação do georreferenciamento na gestão de faixas de domínio oferece diversas vantagens significativas. Em primeiro lugar, possibilita um mapeamento preciso e atualizado dessas áreas, permitindo às autoridades responsáveis monitorar sua utilização, identificar eventuais invasões ou ocupações irregulares e tomar medidas corretivas de forma ágil e eficiente.

3.1.1 Administração e Fiscalização das Faixas de Domínio

Uma das principais aplicações do georreferenciamento na administração e fiscalização das faixas de domínio é a identificação de invasões e ocupações irregulares. Por meio de imagens de satélite e dados georreferenciados, é possível detectar áreas onde ocorreram ocupações não autorizadas, permitindo às autoridades competentes tomar medidas corretivas para garantir a integridade das faixas de domínio. Além disso, o georreferenciamento possibilita o monitoramento contínuo de obras realizadas nas faixas de domínio, permitindo acompanhar o progresso das atividades, identificar eventuais desvios em relação ao projeto original e garantir o cumprimento das normas de segurança e qualidade estabelecidas. Isso contribui para evitar a ocorrência de atrasos e custos adicionais durante a execução das obras.

Outra aplicação prática do georreferenciamento é na realização de manutenção preventiva das faixas de domínio. Por meio da análise de dados geoespaciais, é possível identificar áreas que apresentam maior propensão a problemas, como erosão do solo, obstrução de drenagem ou deslizamentos de terra, permitindo antecipar ações corretivas para evitar danos à infraestrutura viária.

Além disso, o georreferenciamento pode ser utilizado na gestão de ativos das faixas de domínio, permitindo o registro e monitoramento de todos os elementos presentes, como sinalização viária, barreiras de proteção, áreas de escape e dispositivos de segurança. Isso facilita a programação de atividades de manutenção e a alocação eficiente de recursos para garantir a segurança e funcionalidade das vias.

Um exemplo prático de aplicação do georreferenciamento na administração e fiscalização das faixas de domínio é o uso de drones para inspeções aéreas. Esses dispositivos podem sobrevoar áreas extensas rapidamente, capturando imagens de alta resolução que podem ser posteriormente analisadas por meio de software de georreferenciamento para identificar problemas ou irregularidades.

Resumidamente, o georreferenciamento oferece uma série de ferramentas e técnicas que podem ser



JESUS MAURO VIEIRA DE OLIVEIRA,
 ANDREA AMAZILES LOUSADA, BRUNO MAIA SORIANO LOUSADA,
 CAROLINE CHAHINI RIBEIRO, JANDUHY PEREIRA DOS SANTOS,
 MAURÍCIO THEODÓSIO MATTOS MARQUES & RICARDO SAMESHIMA TABA

utilizadas para facilitar a administração e fiscalização das faixas de domínio. Sua aplicação permite uma gestão mais eficiente e proativa dessas áreas, contribuindo para a segurança viária e a integridade das infraestruturas de transporte.



Figura 3 - Utilização de drones na gestão e fiscalização de faixas de domínio (<https://dronecerto.com.br/monitoramento-com-drones>, 2024)

3.2.2 As atividades da Gegegeo, do DER/DF em Faixas de Domínio

A atuação da Gerência de Geoinformação – Gegegeo, do Departamento de Estradas de Rodagem, subordinada à Coordenação de Planejamento (Coplan) do Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal - DER/DF, é voltada para as atividades relativas à operação de sistemas de geoprocessamento e de tratamento de informações geográficas.

Tendo desenvolvido o DERGeo, um ambiente virtual de baseado em nuvem visualizador de informações espaciais, a Gegegeo permite acesso e interação às informações referentes aos mapas rodoviários produzidos, bem como aos dados vetoriais, às aplicações desenvolvidas na autarquia e outras informações pertinentes ao SRDF, dentre elas o acompanhamento às faixas de domínio, podendo ser disponibilizadas informações que permitam o gerenciamento e fiscalização dessas faixas pela Diretoria de Faixas de Domínio-DIDOM (Fig. 4 DER/Gegeo,2024).



Figura 4 - Tela do DERGeo com faixas de domínio do SRDF (DER/Geo, 2024)

A camada de Faixas de Domínio do SRDF no DERGeo traz as informações vetorizadas relativas às faixas de domínio e sua respectiva tabela (Figura 5, DERGeo, 2024), onde poderão ser consultados



DOI: 10.29327/1430212.49-16

“APLICAÇÃO DE GEORREFERENCIAMENTO EM DESAPROPRIAÇÕES E GERENCIAMENTO DE FAIXAS DE DOMÍNIO NO DER/DF: EFICIÊNCIA E SEGURANÇA VIÁRIA”

os dados de localização, extensão e largura. Tais informações subsidiam na necessidade de qualquer intervenção que deva ser procedida para corrigir eventuais erros ou atender às demandas de lindeiros que se sintam prejudicados.

ID	Ido	Seção	Feição	Extensão	Lei	Grupo PD	Alt. P1	Alt. P2	Alt. sup. e	Ext. larg. e
1	OP-000	ENR/ 00-4700P-000	ENR/ 00-4700P-000	07,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	07,0	0,0	0,0
2	VC-000	ENR/ 00-000	ENR/ 00-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
3	VC-001	ENR/ 00-001	ENR/ 00-001	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
4	OP-000	ENR/ 00-000P-000	ENR/ 00-000P-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
5	VC-000	ENR/ 00-000	ENR/ 00-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
6	VC-000	ENR/ 00-000	ENR/ 00-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
7	OP-000	ENR/ 00-000P-000	ENR/ 00-000P-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
8	OP-000	ENR/ 00-000P-000	ENR/ 00-000P-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
9	OP-000	ENR/ 00-000P-000	ENR/ 00-000P-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
10	OP-000	ENR/ 00-000P-000	ENR/ 00-000P-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
11	OP-000	ENR/ 00-000P-000	ENR/ 00-000P-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
12	OP-000	ENR/ 00-000P-000	ENR/ 00-000P-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
13	VC-000	ENR/ 00-000	ENR/ 00-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
14	OP-000	ENR/ 00-000P-000	ENR/ 00-000P-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
15	OP-000	ENR/ 00-000P-000	ENR/ 00-000P-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
16	VC-000	ENR/ 00-000	ENR/ 00-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0
17	VC-000	ENR/ 00-000	ENR/ 00-000	0,0	Decreto nº 27.060, de 17 de Jul. de 2016	II	0	0,0	0,0	0,0

Figura 5 - Informações relacionadas às faixas de domínio (DER/DERGeo, 2024)

A maioria das demandas relacionadas às faixas de domínio, são decorrentes da evolução imobiliária, pelo surgimento de novos núcleos habitacionais, ou pela instalação de equipamentos que ocupam a faixa de domínio sem proceder o devido processo de solicitação junto ao DER/DF. Pode-se observar também, por meio do mapa de faixas de domínio, se existe ocorrência de alguma irregularidade, permitindo assim elaborar uma metodologia de trabalho para a correção do que for necessário.

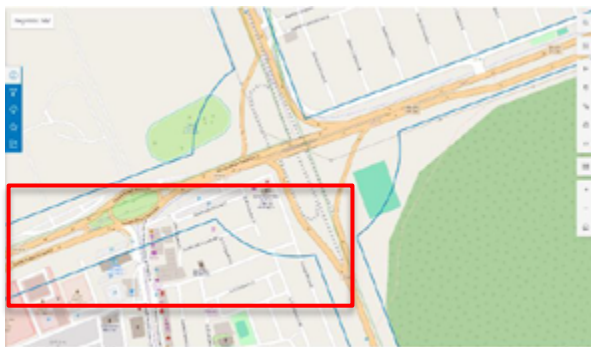


Figura 6 - Ocorrência de Unidades Habitacionais na faixa de domínio (DER/DERGeo, 2024)

CONCLUSÃO

A implementação de georreferenciamento em , fiscalização, desapropriações e no gerenciamento de faixas de domínio no Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER/DF) representa um avanço significativo para a eficiência e segurança viária. Com o uso de tecnologias de ponta, como sistemas de posicionamento global (GPS), drones e software de mapeamento geoespacial, o DER/DF tem conseguido mapear com precisão as áreas necessárias para projetos de infraestrutura. Isso não só agiliza o processo de desapropriação, como também assegura que as faixas de domínio sejam geridas de forma otimizada, minimizando disputas e facilitando a implementação de melhorias viárias.



JESUS MAURO VIEIRA DE OLIVEIRA,
ANDREA AMAZILES LOUSADA, BRUNO MAIA SORIANO LOUSADA,
CAROLINE CHAHINI RIBEIRO, JANDUHY PEREIRA DOS SANTOS,
MAURÍCIO THEODÓSIO MATTOS MARQUES & RICARDO SAMESHIMA TABA

Os benefícios do georreferenciamento no DER/DF são numerosos. Primeiramente, ele proporciona uma visão detalhada e atualizada das condições do terreno e da infraestrutura existente, permitindo um planejamento mais eficaz e a alocação eficiente de recursos. Além disso, a precisão dos dados georreferenciados ajuda a reduzir erros na delimitação das faixas de domínio, evitando conflitos legais e garantindo que os projetos de infraestrutura sejam executados dentro dos parâmetros estabelecidos. A utilização dessas tecnologias também melhora a transparência e a comunicação com os proprietários afetados, promovendo uma abordagem mais justa e equitativa nas desapropriações. Ademais, a integração dessas tecnologias permite que o DER/DF monitore continuamente as faixas de domínio, detectando rapidamente quaisquer alterações ou invasões que possam comprometer a segurança viária. Isso é crucial para a manutenção proativa da infraestrutura, possibilitando intervenções rápidas e eficazes quando necessário. A capacidade de coletar e analisar dados em tempo real também contribui para a tomada de decisões informadas, garantindo que as medidas adotadas sejam baseadas em informações precisas e atualizadas.

Por fim, a implementação do georreferenciamento abre novas oportunidades de geração de recursos para o DER/DF. A venda de dados geoespaciais detalhados para outras instituições públicas e privadas, bem como a prestação de serviços de mapeamento e análise geoespacial, podem se tornar fontes adicionais de receita. Este modelo de negócios pode financiar ainda mais inovações e melhorias na infraestrutura viária, criando um ciclo virtuoso de desenvolvimento e segurança. Em suma, o uso do georreferenciamento no DER/DF não só melhora a eficiência e a segurança das operações viárias, mas também posiciona a instituição como um líder em tecnologia e gestão de infraestrutura no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS DEPARTAMENTOS ESTADUAIS DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Gestão, fiscalização e desapropriação das faixas de domínio em rodovias estaduais e do Distrito Federal**. Brasília, 2023.

BRASIL, 2011. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Geral de Planejamento e Pesquisa. Divisão de Supervisão/Desapropriação. **Diretrizes Básicas para Desapropriação** – Rio de Janeiro: IPR, 2011.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. IS-203 – **Estudos Hidrológicos, Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários**. Ministério dos Transportes, 2006;

JUSTEN FILHO, M. **Curso de direito administrativo**. – 10. Edição, rev. atual – São Paulo: Revista dos Tribunais, 2014.

TEODORO, Roberto Leal; et. al. **Faixa de Domínio: Circunscrição da Área da União – Esfera Estadual e Federal**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 01, Vol. 01, pp. 113-128, Janeiro de 2018. ISSN:2448-0959



MONITORAMENTO DA MASTOFAUNA: UMA FERRAMENTA AUXILIAR PARA TOMADA DE DECISÕES VISANDO A IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO EM RODOVIAS

Lucas Adriano Pachla^{1, 2}; Rachel Cristina Talin Rua¹; Alexandra Lemos¹; Luiz Carlos de Lima Leite³ & Josani Carbonera Pereira³

RESUMO

A expansão dos empreendimentos lineares tem sido crucial para o desenvolvimento humano, embora seus impactos nas paisagens naturais sejam consideráveis, afetando a fauna e a conectividade dos ecossistemas. Dessa forma, a preservação da vida selvagem em áreas rodoviárias tornou-se uma preocupação global, exigindo novas estratégias de mitigação de impactos. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi utilizar o monitoramento da mastofauna para mapear trechos críticos para a fauna e direcionar medidas mitigatórias, considerando as características e atributos das espécies registradas. O estudo foi realizado sazonalmente no ano de 2023 em um trecho de 26,595 km da ERS-020, no nordeste do RS. Para a coleta dos dados, utilizaram-se câmeras trap em dez pontos distintos, juntamente com transectos diurnos e noturnos ao longo de todo o trecho de estudo da rodovia. Foi construída uma curva de acúmulo de riqueza de espécies para determinar a equivalência do esforço amostral, e posteriormente, os trechos da rodovia foram classificados por meio de uma tabela qualitativa com os requisitos mínimos para cada grau de ameaça. Registrou-se 21 espécies, classificando três trechos como risco crítico, dois como risco grave, dois como risco moderado e três como risco baixo. Com base na análise dos trechos, foram sugeridas medidas mitigatórias para as áreas mais sensíveis registradas, visando maior eficiência e destinação assertiva dos recursos financeiros. Dessa forma, o monitoramento da mastofauna apresenta-se como uma alternativa promissora para o desenvolvimento sustentável e conservação de espécies.

PALAVRAS-CHAVE: Medidas mitigatórias; trechos críticos; desenvolvimento sustentável;

ABSTRACT

The expansion of linear enterprises has been crucial for human development, although their impacts on natural landscapes are considerable, affecting fauna and ecosystem connectivity. Therefore, the preservation of wildlife in road areas has become a global concern, requiring new impact mitigation strategies. In this sense, the objective of this study was to use mammal fauna monitoring to map critical stretches for fauna and direct mitigation measures, considering the characteristics and attributes of the recorded species. The study was carried out seasonally in the year 2023 on a 26.595 km stretch of the ERS-020, in the northeast of RS. To collect data, trap cameras were used at ten different points, along with daytime and nighttime transects along the entire study section of the highway. A species richness accumulation curve was constructed to determine the equivalence of the sampling effort, and subsequently, the sections of the highway were classified using a qualitative table with the minimum requirements for each degree of threat. 21 species were recorded, classifying three sections as critical risk, two as severe risk, two as moderate risk and three as low risk. Based on the analysis of the sections, mitigating measures were suggested for the most sensitive areas recorded, aiming for greater efficiency and assertive allocation of financial resources. Therefore, monitoring mammal fauna presents itself as a promising alternative for sustainable development and species conservation.

KEY WORDS: Mitigating measures critical excerpts; sustainable development.

¹ ENECON Engenharia Ltda, e-mail: lucas.pachla@hotmail.com; rachel.ruas@enecon.com.br; alexandra.lemos@enecon.com.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, e-mail: lucas.pachla@ufrgs.br

³ Superintendência de Meio Ambiente SMA/DGP/DAER, e-mail: luizcl@daer.rs.gov.br; josani@daer.rs.gov.br



INTRODUÇÃO

Os empreendimentos lineares, como ferrovias, rodovias e estradas, representam um grande avanço para o desenvolvimento da humanidade e têm tido um impacto significativo nas paisagens naturais ao longo do século XX, resultando em grandes alterações nas populações da fauna e na quebra da conectividade dos ecossistemas (FORMAN et al., 2003; BOND; JONES, 2008). A conservação das populações de vida selvagem impactadas pelas estradas ganhou reconhecimento como uma questão de preocupação mundial (MOORE et al., 2023). Por isso, muitos profissionais conservacionistas argumentam que as populações de animais selvagens representam uma das questões mais urgentes da conservação atual (BARRIENTOS et al., 2021).

De acordo com uma estimativa realizada por Pinto et al., (2022), o número de mamíferos de médio e grande porte que são mortos nas estradas no território brasileiro pode chegar a 9 milhões de indivíduos anualmente. Dentre estes, algumas espécies podem atingir mais de 200 mil indivíduos mortos por ano. O estudo considerou apenas as estradas onde os acidentes potencialmente ocorrem. Sendo assim, as rodovias são indicadas como a mais evidente causa de letalidade de vertebrados por atuação direta de atividades antrópicas no Brasil e no mundo (BAGER et al., 2016).

Dessa forma, a importância de novas soluções e estudos na área de fauna e estradas é crucial, a fim de desenvolver abordagens inovadoras para mitigar os impactos negativos nas populações de animais selvagens (FRAIR et al., 2008). Investir em pesquisas que visam entender melhor as interações entre estradas e fauna, bem como implementar medidas eficazes de monitoramento e mitigação, é fundamental para preservar a biodiversidade e manter a conectividade dos ecossistemas (DE FREITAS et al., 2014; MARTINS et al., 2024). Esses esforços também contribuem para o desenvolvimento de políticas mais sustentáveis e para a promoção de práticas de planejamento urbano que considerem a conservação da biodiversidade como parte integrante do processo de desenvolvimento (FORMAN et al., 2003; BECKMANN, J.P et al., 2010).

Nesse sentido, estudos de monitoramento de fauna são ferramentas fundamentais para o estabelecimento de estratégias de conservação de espécies e ambientes, uma vez que permitem conhecer tendências ao longo do tempo e espaço (NASCIMENTO et al., 2022). Os resultados também geram subsídios para avaliar a estrutura, a transformação e a destruição da paisagem, a viabilidade das populações locais, assim como para propor medidas para reduzir o impacto humano (YOCCOZ; NICHOLS; BOULINIER, 2001). Portanto, o objetivo deste estudo foi utilizar os resultados do monitoramento da mastofauna para mapear os trechos críticos para a fauna, considerando as características e atributos das espécies presentes. Com isso, buscou-se direcionar com maior assertividade os pontos de instalação das medidas mitigatórias, visando aumentar a eficácia dessas medidas e minimizar os impactos da rodovia sobre a fauna.



DOI: [10.29327/1430212.49-65](https://doi.org/10.29327/1430212.49-65)

MONITORAMENTO DA MASTOFAUNA:
UMA FERRAMENTA AUXILIAR PARA TOMADA DE DECISÕES VISANDO A IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO EM RODOVIAS

METODOLOGIA

Área De Estudo

A área deste estudo se trata de uma obra de pavimentação asfáltica em fase de instalação localizada na Rodovia ERS-020, com um segmento de 26,595 quilômetros que liga os municípios de Camará do Sul a São José dos Ausentes na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (FIGURA 01).

Segundo a classificação do Sistema de Köppen, o clima da região é subtropical úmido sem estação seca definida, com verão ameno (Cfb) (CASTIGLIO; CAMPAGNOLO, 2021). O bioma é Mata Atlântica, com vegetação formada pela Floresta Ombrófila Mista e campos de altitude, onde as araucárias (*Araucaria angustifolia*) são predominantes e estão associadas a outras espécies como o pinheiro-bravo (*Podocarpus lambertii*) e a bracatinga (*Mimosa scabrella*) (PILLAR, 2009).

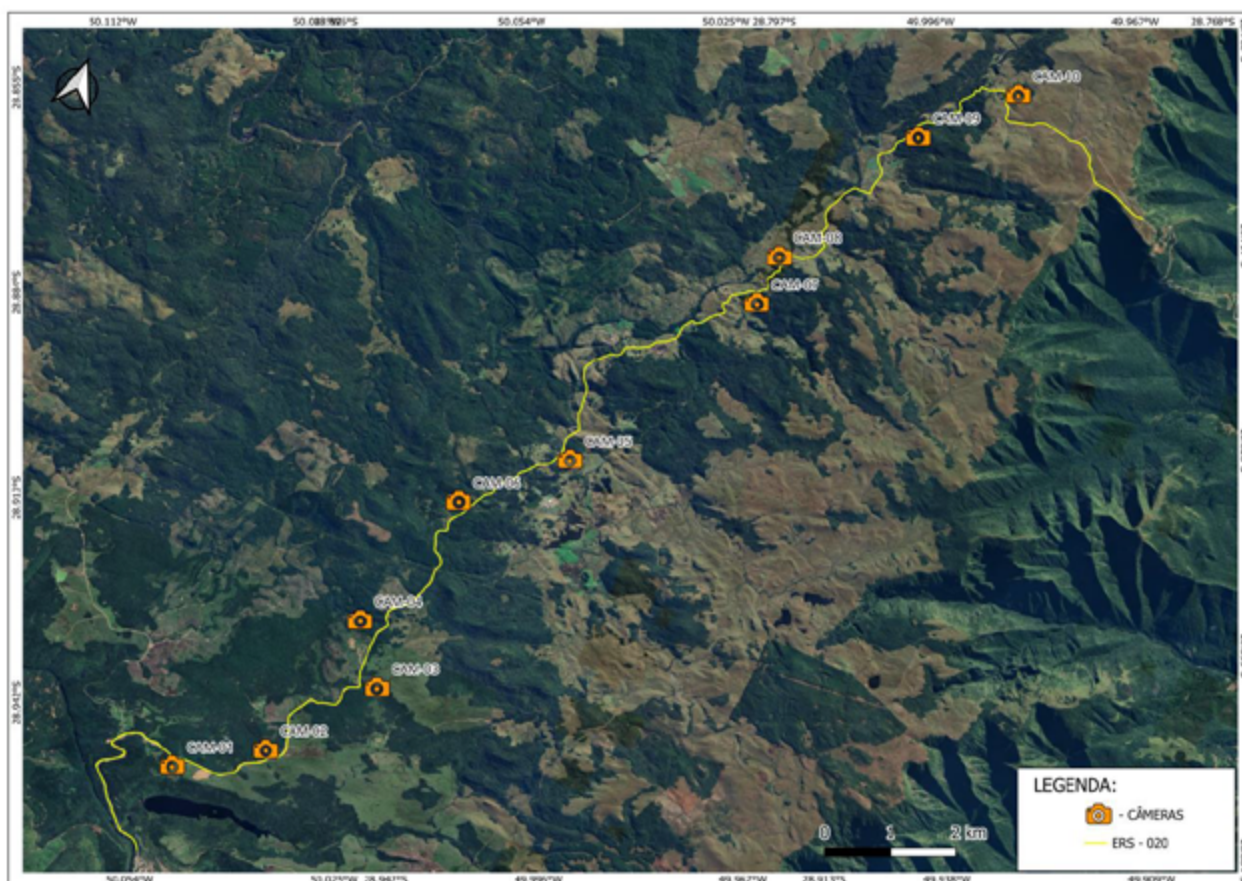


Figura 01. Mapa com os pontos de amostragem para mastofauna. CAMs representam os pontos das armadilhas fotográficas e a linha em amarelo representa o trecho dos transectos noturnos e diurnos (Pachla et al., 2024).



Coleta Dos Dados

A coleta de dados foi planejada para ter uma representatividade espacial e temporal ampla do trecho da rodovia ERS-020, com o intuito de identificar os trechos críticos para a fauna com maior precisão. Para isso, foi utilizado metodologias de monitoramento da mastofauna que não interferem no ambiente, com esforços incluindo transectos diurnos e noturnos, e armadilhas fotográficas sazonais durante as estações de verão, outono, inverno e primavera de 2023.

As armadilhas fotográficas foram estrategicamente instaladas ao longo dos 26,595 km da ERS-020, com cinco armadilhas em cada lado da rodovia, totalizando 10 pontos de monitoramento. As câmeras permaneceram instaladas por 60 dias em cada estação, sendo 30 dias no interior da mata e 30 dias na borda da mata em cada ponto, para maximizar os registros dos indivíduos.

Para os transectos foram realizadas duas amostragens por estação ao longo da rodovia, sendo uma amostragem diurna e uma amostragem noturna, totalizando oito transectos ao total. Cada transecto contou com a presença de dois observadores em um veículo, seguindo diferentes horários. As amostragens diurnas foram realizadas entre 6h e 17h e as noturnas entre 19h e 5h, com uma velocidade máxima de 20 km/h. Durante as amostragens noturnas, os observadores utilizaram faróis do veículo e um silibim manual de longo alcance para ampliar o campo de visão, permitindo registrar indivíduos nas margens da rodovia.

Análise Dos Dados

Os dados coletados foram agrupados em 10 trechos, combinando informações dos transectos e das câmeras trap ao longo da ERS-020. Foi empregada uma curva de suficiência amostral utilizando os estimadores bootstrap e Chao1. Para a determinação do mapa dos pontos críticos foi elaborada uma tabela com as características da fauna que atribuíram os graus de ameaça para cada trecho (Tabela 01).

Tabela 01. Tabela com os requisitos para cada grau de ameaça (Pachla et al., 2024).

Grau de ameaças do trecho			
Baixo	Moderado	Grave	Crítico
Riqueza (até 2 espécies).	Riqueza (mínimo 3 espécies).	Riqueza (mínimo 5 espécies).	Riqueza (mínimo 7 espécies).
Abundância de registros (até 5 registros).	Abundância de registros (mínimo 6 registros).	Abundância de registros (mínimos 10 registros).	Abundância de registros (mínimo 15 registros).
Ausência de animais de grande porte.	Presença de animais de grande porte.	Presença de animais de grande porte.	Presença de animais de grande porte.



DOI: 10.29327/1430212.49-65

MONITORAMENTO DA MASTOFAUNA:

UMA FERRAMENTA AUXILIAR PARA TOMADA DE DECISÕES VISANDO A IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO EM RODOVIAS

Ausência de animais topo de cadeia.	Ausência de animais topo de cadeia.	Presença de animais topo de cadeia.	Presença de animais topo de cadeia.
Ausência de animais ameaçados.	Ausência de animais ameaçados.	Ausência de animais ameaçados.	Presença de animais ameaçados.

*Para ser atribuído o grau o trecho precisa corresponder a pelo menos um dos requisitos pré-estabelecidos.

Todas as análises foram realizadas utilizando os pacotes “dplyr”, “vegan” e “tidyverse” do software R (R CORE TEAM, 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante as amostragens de mastofauna foi possível a identificação de 21 espécies, distribuídas em 10 famílias e 6 ordens (Tabela 02). Deste montante total, 20 espécies podem ser consideradas de médio ou grande porte (quando peso médio do indivíduo adulto ultrapassa 1 kg) e apenas uma espécie de pequeno porte (quando peso médio do indivíduo adulto é inferior a 1 kg) (CHIARELLO, 1999; PETERS et al., 2010). Além disso, foram encontradas espécies ameaçadas e topo de cadeia, que contribuiriam para determinar os trechos mais críticos.

Tabela 02. Tabela taxonômica das respectivas espécies de mamíferos registradas até o momento no monitoramento de fauna e bioindicadores.

Família	Espécie	Nome comum	Nº de indivíduos Registrados	Grau de ameaça IUCN/Decreto/MMA
Cervidae	<i>Subulo Gouzoubira</i>	Veado-virá	53	LC/-/-
Suidae	<i>Sus scrofa</i>	Javali	23	Exótico
Canidae	<i>Cerdocyon thous</i>	Graxaim-do-mato	18	LC/-/-
Felidae	<i>Puma concolor</i>	Onça-parda	14	LC/EN/VU
Felidae	<i>Leopardus pardalis</i>	Jaguaritica	2	LC/VU/-
Mephitidae	<i>Conepatus chinga</i>	Zorrilho	6	LC/-/-
Procyonidae	<i>Procyon cancrivorus</i>	Mão-pelada	7	LC/-/-
Procyonidae	<i>Nasua nasua</i>	Quati	4	LC/VU/-
Felidae	<i>Leopardus guttulus</i>	Gato-do-mato-pequeno	10	VU/VU/VU
Felidae	<i>Leopardus weidii</i>	Gato-maracajá	2	NT/VU/VU
Mustelidae	<i>Eira barbara</i>	Irara	4	LC/VU/-
Canidae	<i>Lycalopex gymnocercus</i>	Graxaim-do-campo	4	LC/-/-
Caviidae	<i>Hydrochoerus hydrochaeris</i>	Capivara	4	LC/-/-
Dasypodidae	<i>Dasytus novemcinctus</i>	Tatu-galinha	6	LC/-/-
Chlamyphoridae	<i>Euphractus sexcinctus</i>	Tatu-peludo	2	LC/-/-
Didelphidae	<i>Didelphis albiventris</i>	gambá-de-orelha-branca	7	LC/-/-



Atelidae	<i>Alouatta guariba clamitans</i>	bugio-ruivo	1	VU/VU/VU
Erithizontidae	<i>Coendou spinosus</i>	Ouriço-cacheiro	1	LC/-/-
Caviidae	<i>Cavia aperea</i>	Préa	16	LC/-/-
Dasyproctidae	<i>Dasyprocta azarae</i>	Cutia	1	DD/VU/-
Myrmecophagidae	<i>Tamandua tetradactyla</i>	Tamanduá-mirim	1	LC/VU/-

* Os possíveis graus de ameaça de extinção identificados para o Decreto N.º 51.797, DE 8 DE SETEMBRO DE 2014 são: Deficiência de dados = DD, VU = Vulnerável, EN = Em Perigo, CR = Criticamente em Perigo e RE= regionalmente extintas – RE. Já os possíveis graus de ameaça de extinção para a lista da IUCN são; Deficiência de dados = DD, pouco preocupante = LC, quase ameaçada = NT, vulnerável = VU, em perigo = EM, criticamente em perigo = CR. Portaria N.º 148, DE 7 DE JUNHO DE 2022 são: VU - Vulnerável, EM - Em Perigo, CR - Criticamente em Perigo, CR (PEX) - Criticamente em Perigo (Provavelmente Extinta).

Em relação à suficiência amostral, abrangendo todas as unidades amostrais e seus respectivos ambientes de registro, observa-se uma estabilidade na curva de acumulação de espécies ao longo dessas amostragens, como demonstrado na Figura 02. Portanto, o esforço de campo empregado para o trecho da ERS-020 estudado é considerado suficiente. Essa estabilidade na curva de acumulação de espécies fornece sustentação em relação à eficiência das metodologias aplicadas e fortalece a relação dos dados obtidos.

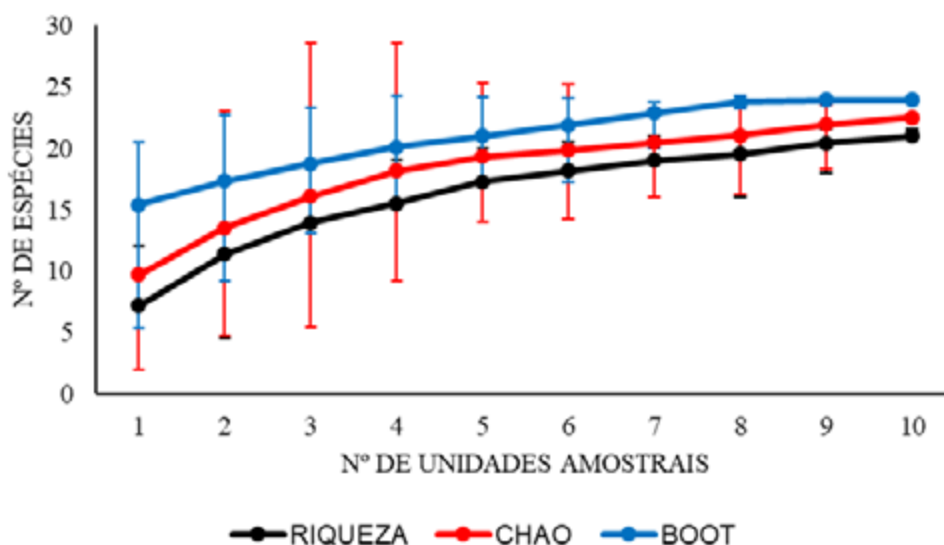


Figura 02. Curva de acumulo de espécies de mamíferos para a região da AID da ERS-020.

De forma geral, para se indicar espécies que denotem equilíbrio ambiental e trechos mais ou menos críticos espacialmente, é necessário avaliar a comunidade como um todo, como por exemplo, grupos de espécies que são abundantes, que possuem hábitos distintos, nativas ou exóticas, raras ou ameaçadas (BANKS-LEITE et al., 2014). Além disso, regiões que abrigam uma comunidade diversificada e bem organizada de mamíferos, distribuídos em diferentes níveis da cadeia trófica e com a presença de predadores de topo, são consideradas regiões saudáveis e



DOI: [10.29327/1430212.49-65](https://doi.org/10.29327/1430212.49-65)

MONITORAMENTO DA MASTOFAUNA:
UMA FERRAMENTA AUXILIAR PARA TOMADA DE DECISÕES VISANDO A IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO EM RODOVIAS

merecem atenção especial para a conservação ambiental (DA FONSECA; ROBINSON, 1990; PARDINI, 2004).

Levando em conta os critérios acima, dentre as espécies encontradas até o momento, destaca-se a ocorrência de quatro topo de cadeia, *Puma concolor* (Onça-parda), *Leopardus pardalis* (Jaguaritica), *Leopardus weidii* (gato-maracajá) e *Leopardus guttulus* (Gato-do-mato-pequeno) (Figura 03), todas configuram pelo menos em uma ou mais listas de espécies ameaçadas em âmbito nacional, regional e internacional (DECRETO N.º 51.797, DE 8 DE SETEMBRO DE 2014, PORTARIA MMA N.º 148, DE 7 DE JUNHO DE 2022 e a IUCN). Estas espécies, enquadram-se no conceito de espécies “chave”, “bandeira” ou “guarda-chuva”, ou seja, espécies que quando efetivamente protegidas, acabam estendendo sua proteção a todo ecossistema em que estão inseridas (FEINSINGER, 2001). Sendo assim, podem ser consideradas bioindicadoras, uma vez que são sensíveis às mudanças ambientais e às alterações nas populações de suas presas. Outro ponto importante é a ampla distribuição destas espécies, tornando-as úteis para a avaliação da qualidade ambiental de uma região, pois sua presença ou ausência pode fornecer informações sobre a saúde do ecossistema em que habitam.

Outra espécie importante registrada é o bugiu-ruivo (*Alouatta guariba clamitans*) (Figura 03), devido à perda de habitat e à fragmentação das florestas, o bugiu-ruivo enfrenta desafios de conservação, tornando a preservação das áreas naturais vitais para sua sobrevivência. Assim, esta espécie é classificada como “Vulnerável” pelas listas de espécies ameaçadas em âmbito nacional, regional e internacional (DECRETO N.º 51.797, DE 8 DE SETEMBRO DE 2014, PORTARIA MMA N.º 148, DE 7 DE JUNHO DE 2022 e a IUCN). Além disso, por se tratar de uma espécie arbórea, é notável a sua presença no trecho do empreendimento. Dessa forma, foram sugeridas passagens de fauna aéreas próximas aos seus respectivos registros.

Uma das espécies que também merece destaque é a ocorrência do javali (*Sus scrofa*) em ambiente silvestre no entorno da ERS-020 (Figura 03). Esta espécie é originária da Eurásia sendo selecionada para pecuária dando origem à linhagem conhecida por porcos-domésticos (PEREIRA-GARBERO et al., 2013). Conhecidos por sua agressividade, esses animais possuem hábitos noturnos e tendem a formar grupos chamados de varas, contendo de 20 a 100 indivíduos, ocupam geralmente corpos d'água, como campos e matas, devido ao seu considerável tamanho corporal e à sua elevada abundância populacional regional, faz prever frequentes acidentes com um considerável impacto na segurança rodoviária (QUINTELA et al., 2010; MATILDE, 2012). Dessa forma, considerando o grande porte e frequência dos registros durante todas as estações sazonais neste estudo, esta espécie representa um perigo eminente para o trecho em questão, o que torna seus pontos de registros áreas avaliadas como sensíveis a fauna mesmo se tratando de uma espécie exótica.

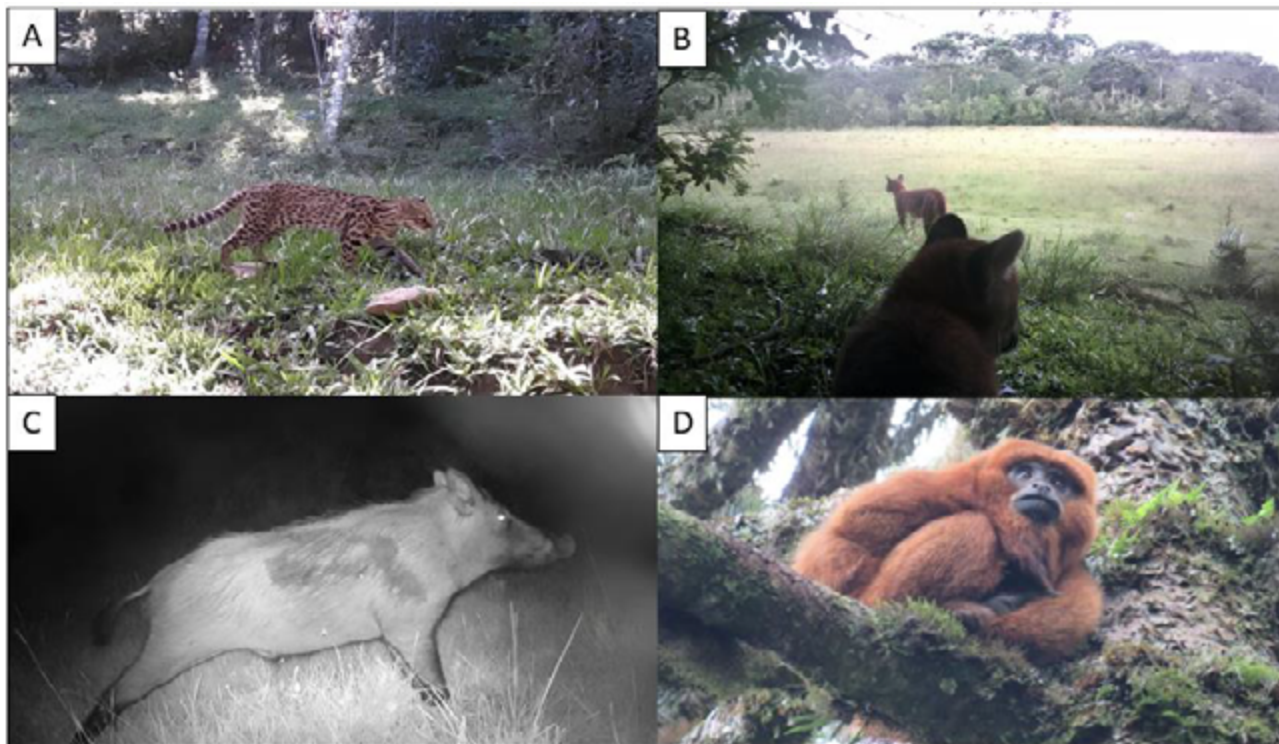


Figura 03. Imagens de algumas das espécies monitoradas no estudo. (A) *Leopardus guttulus* (Gato-do-mato-pequeno), (B) *Puma concolor* (Onça-parda), (C) *Sus scrofa* (Javali), (D) *Alouatta guariba clamitans* (Bugiu- ruivo).

Dessa forma, os trechos da rodovia foram classificados com base nos atributos relevantes para cada grau de ameaça descritos anteriormente na Tabela 01 e levando em consideração as características específicas da fauna registrada na região. A presença significativa de animais como o bugio-ruivo e a identificação de certos trechos como "críticos" e "graves" foram fatores que direcionaram a tomada de decisão de inclusão de medidas mitigatórias.

Com base nisso, os trechos 4, 5 e 9 foram classificados como áreas críticas para a fauna (Figura 04). Entre esses pontos, destaca-se o ponto 9, que em uma avaliação prévia de pontos importantes para a fauna, baseados apenas em áreas de conectividade, não recebeu nenhuma medida mitigatória. No entanto, após uma avaliação mais detalhada durante o monitoramento, revelou-se uma área sensível e, como resultado, foram sugeridas medidas mitigatórias, incluindo passagens de fauna aéreas e terrestres.

Além disso, os trechos 6 e 7 foram classificados como graves. No entanto, o trecho 7 recebeu a sugestão de implementar passadores terrestres, enquanto o ponto 6 foi sugerido para a possibilidade de readequação dos passadores já previstos, especialmente aqueles localizados em áreas menos sensíveis. Ainda, os trechos 3 e 8 foram classificados como moderados, porém o trecho 8 recebeu sugestões de passagem de fauna terrestre para minimizar os possíveis impactos desse trecho. Dessa forma, essas sugestões visam minimizar os impactos da rodovia na fauna local e promover a sua conservação a longo prazo.



DOI: 10.29327/1430212.49-65

MONITORAMENTO DA MASTOFAUNA:

UMA FERRAMENTA AUXILIAR PARA TOMADA DE DECISÕES VISANDO A IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO EM RODOVIAS

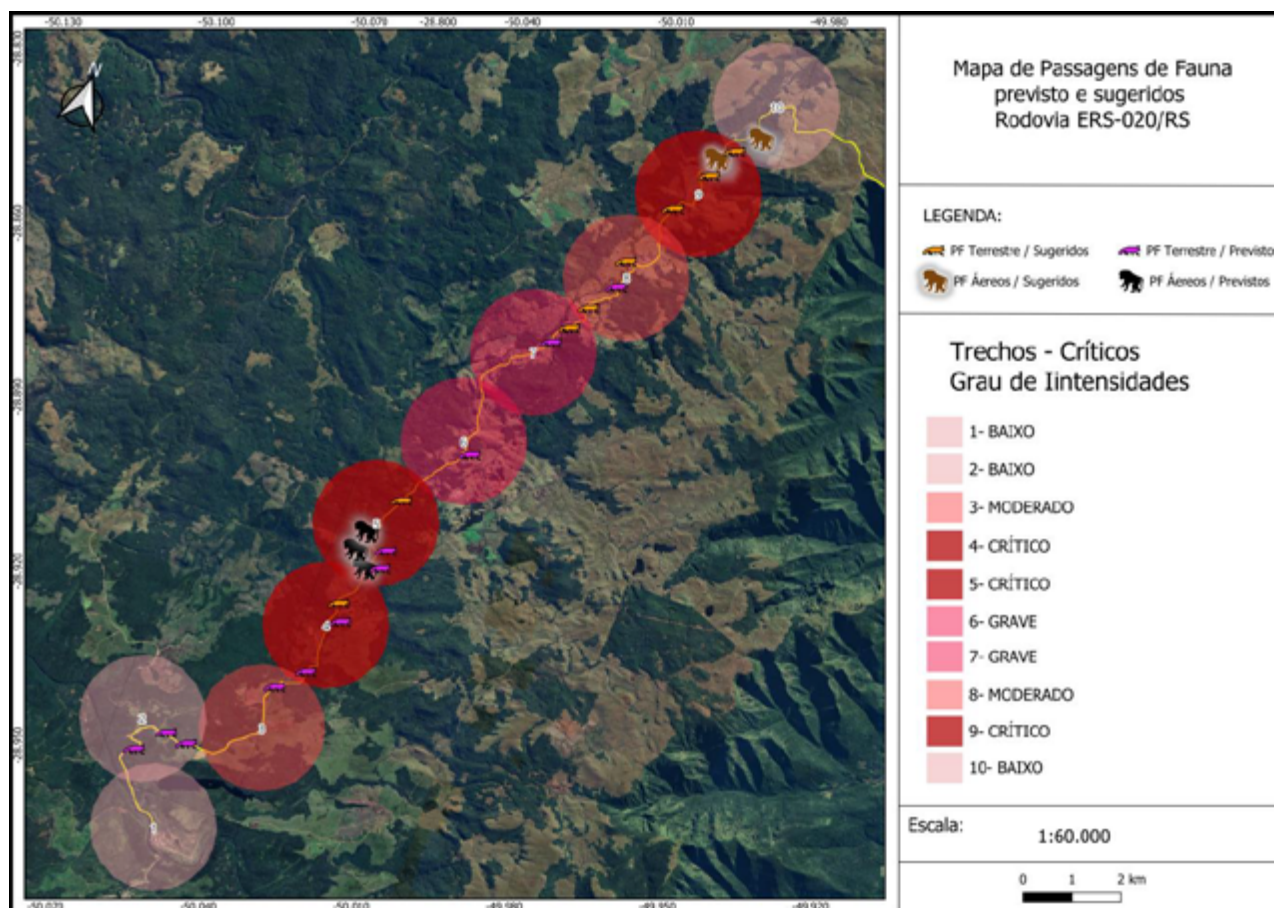


Figura 04. Mapa com os trechos críticos para a fauna, e os respectivos mecanismos de mitigação previstos e sugeridos na ERS-020.

Nesse sentido, a realização de uma análise detalhada e com embasamento científico favoreceu a tomada de decisão e permitiu sugerir passagens de fauna tanto terrestres quanto aéreas, visando uma maior assertividade nas medidas mitigatórias a fim de reduzir os impactos da rodovia. Assim, o monitoramento da mastofauna demonstrou-se uma alternativa promissora para garantir a instalação e efetividade das medidas mitigatórias em pontos estratégicos. Visto que, considerar exclusivamente os pontos de conectividade de aérea pode ser uma alternativa insipiente para conservação das espécies.

De modo geral, destaca-se a importância de se ter um desenho amostral representativo com dados robustos para a prevenção dos possíveis hotspots de fauna. Isso sustenta de forma científica a tomada de decisão e possibilita uma maior assertividade das medidas mitigatórias, aumentando sua eficiência. Assim, contribui não apenas para a conservação de espécies, mas também para evitar gastos com medidas mitigatórias desnecessárias no contexto do ambiente em que estão inseridas.



CONCLUSÃO

Portanto, conclui-se que um esforço amostral bem estruturado com uma análise geral do empreendimento baseada em dados do monitoramento da mastofauna, é uma ferramenta importante na tomada de decisão para implementação de medidas mitigatórias específicas. Auxiliando na conservação da biodiversidade em ambientes afetados por estradas. Essa abordagem não apenas protege as espécies e os ecossistemas, mas também otimiza recursos ao evitar medidas desnecessárias, buscando um equilíbrio entre desenvolvimento e conservação ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGER, A. et al. Os caminhos da conservação da biodiversidade brasileira frente aos impactos da infraestrutura viária. **Biodiversidade Brasileira-BioBrasil**, n. 1, p. 75–86, 2016.

BANKS-LEITE, C. et al. Using ecological thresholds to evaluate the costs and benefits of set-asides in a biodiversity hotspot. **Science**, v. 345, n. 6200, p. 1041–1045, 2014.

BARRIENTOS, R. et al. The lost road: do transportation networks imperil wildlife population persistence? **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 4, p. 411–416, 2021.

BECKMANN, J.P, CLEVENGER, A.P., HUIJSER, M.P. & HILTY, J.A. **Safe passages: highways, wildlife, and habitat connectivity**. [s.l.: s.n.].

BOND, A. R.; JONES, D. N. Temporal trends in use of fauna-friendly underpasses and overpasses. **Wildlife Research**, v. 35, n. 2, p. 103–112, 2008.

CASTIGLIO, V. S.; CAMPAGNOLO, K. Análise da evapotranspiração potencial no município de Cambará do Sul, RS. **Revista Geonorte. Manaus, AM. Vol. 12, n. 39 (jan./jun. 2021), p. 26-43, 2021.**

CHIARELLO, A. G. Effects of fragmentation of the Atlantic forest on mammal communities in south-eastern Brazil. **Biological conservation**, v. 89, n. 1, p. 71–82, 1999.

DA FONSECA, G. A.; ROBINSON, J. G. Forest size and structure: competitive and predatory effects on small mammal communities. **Biological conservation**, v. 53, n. 4, p. 265–294, 1990.

DE FREITAS, S. R. et al. How landscape patterns influence road-kill of three species of mammals in the Brazilian Savanna. **Oecologia Australis**, v. 18, 2014.

DO SUL, R. G. Decreto nº 51.797, de 8 de setembro de 2014. **Declara as Espécies da Fauna Silvestre Ameaçadas de Extinção no Estado do Rio Grande do Sul. Diário Oficial do Estado**, v. 173, 2014.

FEINSINGER, P. **Designing field studies for biodiversity conservation**. [s.l.] Island Press, 2001.

FORMAN, R. T. et al. Road ecology. **Science and solutions**, p. 482, 2003.

FRAIR, J. L. et al. Thresholds in landscape connectivity and mortality risks in response to growing road networks. **Journal of applied ecology**, v. 45, n. 5, p. 1504–1513, 2008.



DOI: [10.29327/1430212.49-65](https://doi.org/10.29327/1430212.49-65)

MONITORAMENTO DA MASTOFAUNA:

UMA FERRAMENTA AUXILIAR PARA TOMADA DE DECISÕES VISANDO A IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO EM RODOVIAS

MARTINS, T. et al. A influência da proximidade com as matas ciliares ea distância das áreas urbanas nos atropelamentos de vertebrados em uma área fragmentada do Cerrado brasileiro. **Austral Ecology**, v. 49, n. 1, p. e13415, 2024.

MATILDE, E. **Contributos para a previsão da ocorrência de acidentes rodoviários por colisão com javalis (Sus scrofa)**. [s.l.] Universidade de Évora, 2012.

MOORE, L. J. et al. Demographic effects of road mortality on mammalian populations: a systematic review. **Biological Reviews**, v. 98, n. 4, p. 1033–1050, 2023.

NASCIMENTO, Y. et al. A importância das atividades de monitoramento da fauna. **Diversitas Journal**, v. 7, n. 4, 2022.

PARDINI, R. Effects of forest fragmentation on small mammals in an Atlantic Forest landscape. **Biodiversity & Conservation**, v. 13, p. 2567–2586, 2004.

PEREIRA-GARBERO, R. et al. Mamíferos invasores en Uruguay, historia, perspectivas y consecuencias. **Revista chilena de historia natural**, v. 86, n. 4, p. 403–421, 2013.

PETERS, F. B. et al. Assembléia de mamíferos dos agroecossistemas constituintes da bacia hidrográfica do rio da Várzea, Rio Grande do Sul. **Biotemas**, v. 23, n. 4, p. 91–107, 2010.

PILLAR, V. DE P. **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. [s.l.] Ministério do Meio Ambiente, 2009.

PINTO, F. A. S. et al. How many mammals are killed on Brazilian roads? Assessing impacts and conservation implications. **Diversity**, v. 14, n. 10, p. 835, 2022.

QUINTELA, F. M. et al. Javalis e porcos ferais (Suidae, *Sus scrofa*) na Restinga de Rio Grande, RS, Brasil: ecossistemas de ocorrência e dados preliminares sobre impactos ambientais. **Neotropical Biology & Conservation**, v. 5, n. 3, 2010.

TEAM, R. C. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. **(No Title)**, 2013.

YOCCOZ, N. G.; NICHOLS, J. D.; BOULINIER, T. Monitoring of biological diversity in space and time. **Trends in ecology & evolution**, v. 16, n. 8, p. 446–453, 2001.



SENSORIAMENTO REMOTO COMO SUPORTE À DEFINIÇÃO DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS

*Alline Gomes Lamenha e Silva*¹; *Mônica Regina Garcez*²; *Cecilia Fortes Merighi*³; *Gracieli Bordin Colpo*⁴ & *Lélio Antônio Teixeira Brito*⁵

RESUMO

A tendência de elevação da temperatura média global influencia diretamente infraestruturas vitais, como as rodovias. A exposição de superfícies pavimentadas a altas temperaturas, pode intensificar seu desgaste e reduzir sua vida útil. Adaptar-se às mudanças climáticas é crucial para manter a integridade e funcionalidade das redes de transporte, ressaltando-se a importância de integrar variáveis climáticas às ações de manutenção de pavimentos. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar, por meio de dados obtidos por sensoriamento remoto, padrões associados à temperatura de superfície do pavimento ao longo de um trecho rodoviário urbano, situado no município de Gurupi/TO. A metodologia incluiu a análise do perfil de temperatura de superfície em 2014, 2018 e 2022 e a identificação de padrões térmicos e de áreas de temperaturas extremas (*cold e hot spots*). A análise revelou variações térmicas no trecho ao longo dos anos, no qual a área de *cold spots* variou entre +21% e +23,7% da superfície, e a área de *hot spots*, de 21,8% a 24,6%. No ano mais quente, também aumentaram as áreas com temperaturas estatisticamente superiores às do entorno. Em 17,4% do trecho, foram identificados *cold spots* persistentes, enquanto em 9,4% da superfície persistiram os *hot spots*. Entende-se que a inclusão de informações sobre as temperaturas de superfície pode auxiliar na adaptação dos ciclos de manutenção do pavimento às mudanças climáticas, e que o uso de dados de sensoriamento remoto pode dar suporte a tais decisões, favorecendo a resiliência e sustentabilidade nas ações de manutenção.

PALAVRAS-CHAVE: mudanças climáticas; padrões térmicos; sensoriamento remoto, conservação de pavimentos.

ABSTRACT

Increasing average global temperatures trend directly influences vital infrastructure such as roads. The exposure of paved surfaces to high temperatures can intensify their deterioration and reduce their remaining life. Adapting to climate change is crucial to maintaining the integrity and functionality of transportation networks, highlighting the importance of integrating climate variables into pavement maintenance actions. In this context, the aim of this study is to analyze, using remote sensing data, patterns associated with pavement surface temperature along an urban segment located in Gurupi/TO, Brazil. The methodology included analyzing the surface temperature profile in 2014, 2018 and 2022 and identifying thermal patterns and areas of extreme temperatures (cold and hot spots). The analysis revealed thermal variations in the segment over the years, in which cold spots areas ranged from +21% and +23.7% of the surface, and that hot spots areas, varied from 21.8% to 24.6%. In the hottest year, areas with statistically higher temperatures than the surrounding area also increased. Persistent cold spots were identified in 17.4% of the surface, while hot spots persisted in 9.4% of this area. Including information on surface temperatures can help to adapt maintenance cycles to climate change, and the use of remote sensing data can support decisions, promoting resilience and sustainability in maintenance actions.

KEY WORDS: climate change; thermal patterns; remote sensing, pavement maintenance.

¹ Instituto Federal de Alagoas, e-mail: alline.silva@ifal.edu.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: monica.garcez@ufrgs.br

³ Ecorodovias, e-mail: Cecilia.Merighi@ecorodovias.com.br

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: gracieli.colpo@ufrgs.br

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: lelio.brito@ufrgs.br



DOI: [10.29327/1430212.49-68](https://doi.org/10.29327/1430212.49-68)

SENSORIAMENTO REMOTO COMO SUPORTE À DEFINIÇÃO DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS

INTRODUÇÃO

As atividades humanas, por meio da emissão de gases de efeito estufa, têm de forma inequívoca ocasionado o aquecimento global, elevando a temperatura média da superfície global em 1,1°C acima dos níveis pré-industriais (IPCC, 2023). Esse fenômeno representa não apenas uma ameaça iminente às condições climáticas, mas também traz implicações significativas para infraestruturas vitais, incluindo as redes de transporte, cuja integridade é crucial para a funcionalidade de setores essenciais como economia, educação e saúde (THACKER S et al., 2021).

Desta forma, medidas adaptativas são necessárias para proteger essas infraestruturas dos impactos adversos decorrentes do aumento das temperaturas médias. Neste contexto, políticas nacionais de adaptação às mudanças climáticas, como o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima, destacam a importância de investigar e entender a relação entre mudanças climáticas e a vulnerabilidade das infraestruturas de transporte. Tais estudos podem subsidiar a identificação de soluções para o setor (BRASIL, 2016).

Desta forma, destaca-se que os planos de manutenção da infraestrutura rodoviária devem considerar não apenas fatores relacionados às condições de tráfego e às características próprias do pavimento, mas também ao clima e ao meio ambiente. Tais aspectos exercem uma influência direta na vida útil do pavimento, na irregularidade da superfície, em sua estrutura, nos materiais e na sua capacidade de suportar cargas de transporte (SONG *et al.*, 2018). Desconsiderar esses aspectos durante a construção e manutenção das estradas pode resultar em danos prematuros, redução da vida útil e aumento dos custos de manutenção.

No contexto das ações de manutenção dos pavimentos rodoviários, tradicionalmente, as temperaturas locais não são explicitamente consideradas. Ressalta-se, então, a necessidade do desenvolvimento de estratégias que possibilitem incorporar essa variável às práticas de manutenção. Assim, dados sobre a variabilidade espacial das temperaturas locais são essenciais para orientar essas estratégias.

REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A utilização de dados de sensoriamento para a avaliação do campo térmico dos territórios vem ganhando destaque, contemplando estudos que objetivam mensurar como as propriedades térmicas dos materiais que constituem as paisagens urbanas e rurais influem nas mudanças climáticas. Nesse contexto, é reconhecido como as superfícies pavimentadas apresentam influência em fenômenos como, por exemplo, a formação de ilhas de calor (LUCENA *et al.*, 2013; SILVA; TORRES, 2021; WANG; BERARDI; AKBARI, 2015). As superfícies pavimentadas, durante o verão, chegam a atingir cerca de 60°C, apresentando temperaturas até 20°C mais altas que o ambiente circundante, devido a sua baixa capacidade de refletir a luz solar (baixo albedo) e alta absorção de radiação solar (NWAKAIRE *et al.*, 2020).

É importante ressaltar, todavia, que as superfícies pavimentadas não apenas influem, mas também são influenciadas pelas alterações nas temperaturas locais. As alterações climáticas afetam significativamente as infraestruturas rodoviárias globalmente, como evidenciado por estudos em



diversas regiões, que indicam um impacto econômico notável nas despesas com reparos rodoviários, caso medidas de adaptação não sejam implementadas (SARROUKH *et al.*, 2024).

Diversos estudos demonstram que o aumento das temperaturas pode ter efeitos significativos nos pavimentos, afetando diretamente seu ciclo de vida. Em rodovias, a degradação do pavimento está diretamente relacionada às alterações do material asfáltico devido ao estresse térmico, quando as temperaturas excedem os limites do projeto (BRASIL, 2016). As mudanças climáticas podem intensificar a formação de sulcos nos pavimentos e diminuir a rugosidade e a capacidade de resistência à derrapagem. O impacto nas fissuras transversais pode variar ao longo do tempo (YAO *et al.*, 2024). Além disso, as altas temperaturas e suas variações, geralmente também conduzem a deflexões significativas (LUKANEN; STUBSTAD; BRIGGS, 2000). Estudos indicam que um aumento de 5% na temperatura média é capaz de aumentar em até 12% o afundamento de trilha de rodas (BRITO; HELLER, 2017).

Diante desses desafios, o sensoriamento remoto oferece uma fonte de dados promissora para entender melhor as dinâmicas térmicas e suas implicações. O uso de imagens obtidas por sensoriamento remoto surge como uma ferramenta poderosa para ampliar a compreensão do campo térmico das superfícies (LANG; BLASCHKE, 2009). Devido à ampla disponibilidade, extensa cobertura regional e periodicidade regular, os produtos de temperatura dos sistemas de sensoriamento remoto por satélite são fontes viáveis, seja no diagnóstico dos impactos de um clima mais quente no sistema rodoviário, quanto na modelagem de cenários futuros (VINCENT; SUSHAMA, 2024).

No entanto, apesar de serem amplamente utilizadas em aplicações destinadas a várias áreas do desenvolvimento sustentável (DESPINI *et al.*, 2021), ainda são limitados os estudos que exploram o potencial desses dados para obter informações relevantes que orientem ações de manutenção do pavimento.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo a condução de um estudo-piloto para analisar, por meio de dados obtidos por sensoriamento remoto, padrões associados à temperatura de superfície do pavimento ao longo de um trecho rodoviário urbano, situado no município de Gurupi/TO.

METODOLOGIA

Para implementar a metodologia de análise sugerida, foi selecionado um segmento da rodovia BR-153/TO, especificamente entre os km 671+190 e km 677+000, situado no município de Gurupi, Tocantins. A escolha desta área de estudo ocorreu na conjuntura da duplicação de um trecho de rodovia situado na zona de transição entre o complexo Regional do Centro-Sul e a Amazônia (Figura 1).



DOI: 10.29327/1430212.49-68

SENSORIAMENTO REMOTO COMO SUPORTE À DEFINIÇÃO DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS



Figura 1. Localização do trecho de estudo.

Foram obtidos os seguintes produtos: i) o perfil de temperatura de superfície do trecho nos anos de 2014, 2018 e 2022; ii) a análise dos padrões térmicos espaciais; e iii) a identificação de áreas com temperaturas significativamente altas (*hot spots*) e baixas (*cold spots*). O procedimento metodológico adotado é ilustrado na Figura 2, e as etapas apresentadas estão descritas em seguida.



Figura 2. Fluxo metodológico.

Os dados de referência foram coletados pela banda termal do satélite Landsat-8, coleção 2, permitindo a estimativa da temperatura da superfície no momento da passagem do satélite. As imagens representativas do verão dos anos de 2014, 2018 e 2022 foram obtidas pelo cálculo da média de todas as imagens disponíveis no referido período. A obtenção dos dados, cálculo da temperatura média de superfície no verão de cada ano e recorte da área de estudo foram realizados por meio da plataforma baseada em nuvem *Google Earth Engine* (GEE).



Além do mapeamento das temperaturas de superfície ao longo do trecho para cada um dos anos, foram obtidas estatísticas básicas da temperatura de superfície do pavimento, a citar: média, máxima, mínima e desvio padrão. Foram, então, traçados os perfis de temperaturas ao longo do trecho para cada ano avaliado, e verificada a relação com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (ROUSE et al., 1973) nas imediações do trecho rodoviário. Tais etapas foram realizadas por meio do *software* ArcGIS Pro 3.2.2.

A avaliação dos agrupamentos espaciais das temperaturas de superfície foi realizada com base na estatística Getis-Ord G_i^* (GETIS; ORD, 1992), possibilitando a identificação de áreas onde estão agrupadas espacialmente as temperaturas superficiais mais elevadas (*hot spots*) ou mais reduzidas (*cold spots*), em relação às temperaturas locais. Foram considerados como *hot spots* ou *cold spots* significativos aqueles calculados com nível de confiança superior a 90%. Em seguida, foi desenvolvido um código em Python para a identificação de pontos que foram classificados como *cold* ou *hot spots* nos três anos avaliados, sendo estes identificados como *cold* ou *hot spots* persistentes. Esta etapa também foi realizada por meio do *software* ArcGIS Pro 3.2.2.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 são apresentadas as estatísticas básicas quanto à temperatura do trecho nos três anos avaliados. A análise dos dados sugere que, enquanto as temperaturas médias e mínimas mostram uma tendência de estabilização ao longo dos anos, as temperaturas máximas têm sido mais voláteis, sugerindo a influência de fatores que podem impactar os extremos de temperatura, mais do que as médias ou mínimas. Embora diversos fatores climáticos e elementos do tempo - como radiação solar, umidade, ventos e a cobertura de nuvens - desempenhem um papel crucial na determinação das temperaturas de superfície, a análise das variações locais podem fornecer indícios sobre implicações das variações térmicas, uma vez que estas podem ser significativas. A variação no desvio padrão reflete essa instabilidade, especialmente evidente no ano de 2018, que apresentou as maiores temperaturas gerais. É importante ressaltar que os dados de temperatura analisados representam um trecho relativamente pequeno, revelando a importância de se avaliar de forma localizada tais aspectos.

Tabela 1. Estatísticas de temperatura obtidas no trecho de estudo, nos três anos avaliados.

Estatística	2014	2018	2022
Temperatura Média (°C)	46,5	45,9	45,8
Temperatura Mínima (°C)	38,5	37,4	37,8
Temperatura Máxima (°C)	50,6	52,4	49,6
Desvio Padrão (°C)	2,9	3,7	2,7

A Figura 3 apresenta a distribuição espacial das temperaturas de superfície ao longo do trecho de estudo, respectivamente para o verão dos anos de 2014, 2018 e 2022. É possível observar padrões espaciais regulares na distribuição das temperaturas de superfície no período investigado, com as temperaturas mais elevadas ocorrendo consistentemente nos mesmos locais ao longo do trecho de estudo. Esta consistência nos padrões espaciais das temperaturas de superfície sugere que certas áreas do pavimento são mais vulneráveis a extremos térmicos. Isso pode ocorrer devido a uma combinação de fatores, como a composição do material, a orientação da rodovia em relação ao sol e a falta de



DOI: 10.29327/1430212.49-68

SENSORIAMENTO REMOTO COMO SUPORTE À DEFINIÇÃO DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS

cobertura vegetal ou sombreamento nas proximidades. Destacando, assim, como o uso e ocupação do solo dos arredores influencia nas temperaturas às quais o pavimento é exposto.

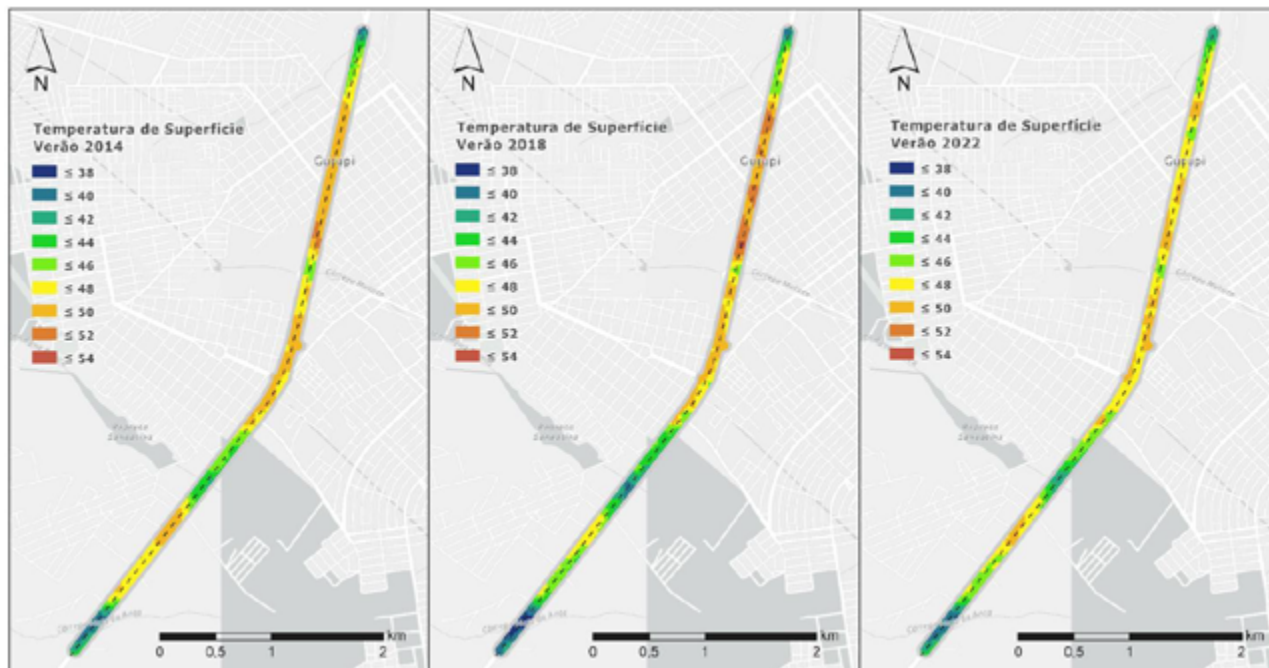


Figura 3. Temperaturas de Superfície identificadas no período de primavera/verão dos anos de 2014, 2018 e 2022.

Essa observação é corroborada pela análise do perfil de temperaturas de superfície, ilustrado na Figura 4, que revela uma distribuição térmica distinta ao longo do trecho estudado. É possível observar picos de temperatura localizados em certos segmentos da via nos três anos avaliados. Esses picos sugerem áreas onde as superfícies pavimentadas absorvem e retêm calor de forma mais intensa. Paralelamente aos picos, também destacam "vales" térmicos, ou seja, segmentos onde as temperaturas são consistentemente mais baixas em comparação com o restante do trecho estudado. Também é observada uma relação entre a cobertura vegetal nas imediações do trecho rodoviário e as temperaturas registradas. Os locais com maior índice de vegetação tendem a apresentar temperaturas mais baixas, enquanto áreas com menor cobertura vegetal exibem temperaturas mais elevadas. Esse fenômeno pode ser atribuído à propriedade da vegetação de proporcionar sombra e promover a evapotranspiração, dois processos que naturalmente resfriam o ambiente. No contexto urbano, a configuração espacial da vegetação e a ocupação do solo na faixa de influência de rodovias podem ter um impacto significativo na temperatura do pavimento, especialmente em áreas mais densamente construídas.



Alline Gomes Lamenha e Silva,
Mônica Regina Garcez, Cecília Fortes Merighi,
Gracieli Bordin Colpo & Lélío Antônio Teixeira Brito

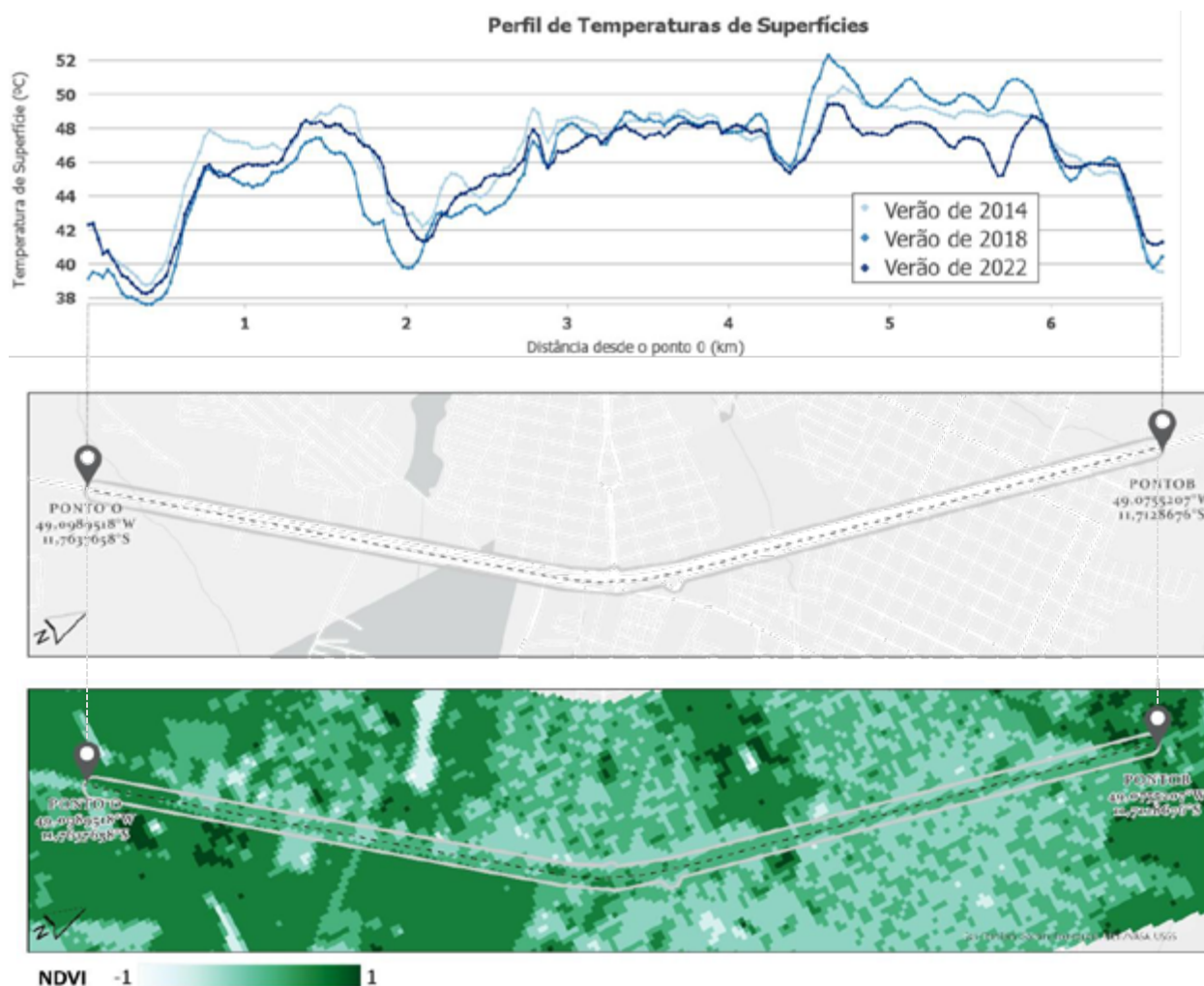


Figura 4. Perfil da Temperatura de Superfície no período de verão dos anos de 2014, 2018 e 2022, ao longo do trecho, e comparação com o índice de vegetação (NDVI).

Na Figura 5 constam os agrupamentos estatisticamente significativos de temperaturas superficiais, revelando uma distinção clara entre as áreas de maior aquecimento (*hot spots*) e de resfriamento (*cold spots*) ao longo do trecho estudado. Em 2014, aproximadamente 21% da superfície foi identificada como *cold spots*, enquanto os *hot spots* compreenderam 23,7% da área. Em 2018, nota-se um incremento nas proporções, com 21,5% da superfície para *cold spots* e 24,6% para *hot spots*, sugerindo uma correlação entre o ano de temperaturas mais elevadas e uma maior incidência de extremos térmicos. Em 2022, tanto as áreas de *cold spots* quanto as de *hot spots* apresentaram uma diminuição, ocupando 18,8% e 21,8% da superfície, respectivamente.



DOI: 10.29327/1430212.49-68

SENSORIAMENTO REMOTO COMO SUPORTE À DEFINIÇÃO DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS

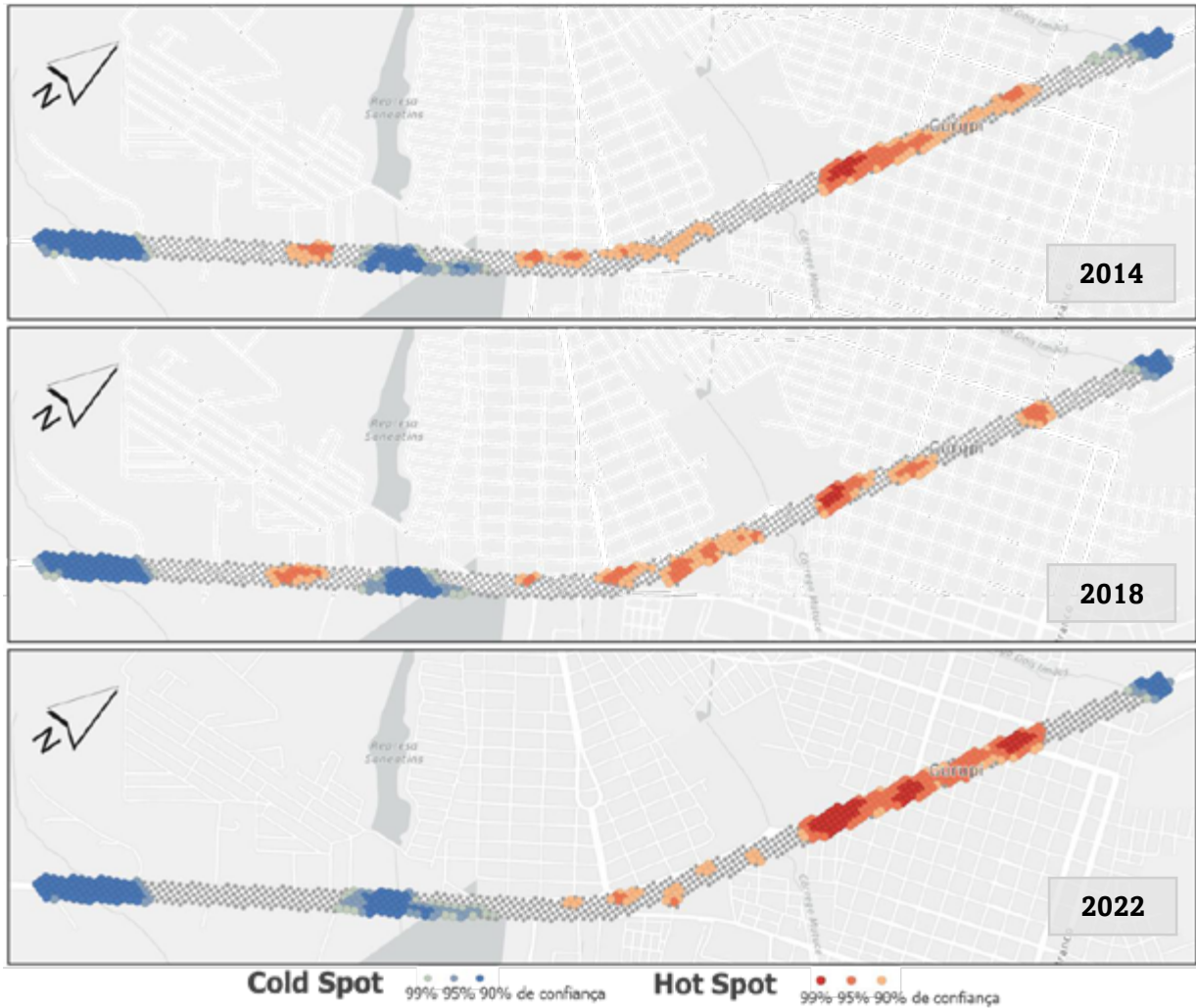


Figura 5. Identificação de *cold* e *hot spots* de temperatura superficial no trecho.

Na Figura 6, observa-se a identificação de locais onde as condições de *hot* ou *cold spots* foram consistentemente reportadas nos três anos avaliados, destacando-se como zonas de estabilidade térmica alterada.



Figura 6. Identificação de *cold* e *hot spots* persistentes de temperatura superficial no trecho.



Essa identificação pode auxiliar na priorização de locais relevantes para o planejamento e a execução da manutenção rodoviária, uma vez que sua constante exposição a temperaturas extremas - significativamente mais altas do que as médias locais - as torna especialmente suscetíveis a danos ou degradação acelerada. As áreas persistentemente classificadas como *hot spots*, por exemplo, estão frequentemente sujeitas a tensões térmicas, que podem acelerar deformações ou outros tipos de falhas estruturais, principalmente em pavimentos com revestimento asfáltico, que por sua natureza viscoelástica, tende a sofrer deterioração prematura quando solicitado pela combinação de altas temperaturas e tráfego de veículos. Por essa razão, esses locais podem demandar inspeções e intervenções mais frequentes para prevenir falhas prematuras e garantir a segurança dos usuários da via.

Por outro lado, as áreas identificadas como *cold spots* persistentes, podem ter um ciclo de manutenção diferente, possivelmente mais espaçado. Embora menos propensas a danos térmicos diretos, podem enfrentar outros desafios, como o acúmulo de umidade, que também comprometem a integridade do pavimento. Nestas zonas, a manutenção pode necessitar de uma abordagem focada na melhoria da drenagem, por exemplo.

CONCLUSÕES

Considerar a questão contextual de variáveis como a temperatura pode auxiliar no desenvolvimento de estratégias de adaptação da infraestrutura rodoviária às mudanças climáticas, priorizando ações em áreas de maior risco térmico e explorando oportunidades para aumentar a resiliência do sistema rodoviário como um todo. A abordagem de considerar não apenas os valores das variáveis em pontos específicos, mas também as condições dos arredores, é fundamental para uma análise mais aprofundada dos padrões térmicos apresentados pelo pavimento, levando em conta a influência dos fatores locais e das características do ambiente circundante.

Ao considerar a temperatura como um fator determinante, surgem possibilidades de ajustes nos ciclos de manutenção dos pavimentos. A expectativa de como a temperatura afetará o desempenho das estruturas pode orientar decisões sobre quando realizar intervenções de manutenção. Nesse sentido, entende-se que os dados termais obtidos por sensoriamento remoto desempenham um papel importante como auxiliares na identificação de áreas com temperaturas. Essas iniciativas têm o potencial de promover avanços na discussão de como a gestão e o planejamento de infraestruturas viárias pode apoiar-se em dados para decisões mais conscientes, contribuindo para a sustentabilidade e a resiliência das rodovias.

Este estudo realizou uma análise da temperatura de superfície ao longo de três anos. Para trabalhos futuros, propõe-se uma investigação mais detalhada, em que todo o conjunto de dados de temperatura de superfície disponível na série histórica seja contemplado, possibilitando uma compreensão mais completa das tendências e variações ao longo do tempo. Além disso, recomenda-se a integração de dados de precipitação. A combinação desses conjuntos de dados enriqueceria a análise, permitindo avaliações fundamentadas nos efeitos das mudanças climáticas sobre a infraestrutura rodoviária. Compreender essas dinâmicas é crucial para o desenvolvimento de estratégias de manutenção de pavimentos mais eficazes e adaptadas às condições climáticas específicas de cada região.



DOI: [10.29327/1430212.49-68](https://doi.org/10.29327/1430212.49-68)

SENSORIAMENTO REMOTO COMO SUPORTE À DEFINIÇÃO DE AÇÕES DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: Estratégia de Infraestrutura**. Brasília: MMA, 2016. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80182/PNA_Estrategia_de_Infraestrutura.pdf. Acesso em: 01 mai. 2024.
- BRITO, L. A. T.; HELLER, L. F. Montagem e validação de um banco de dados climáticos para fins de avaliação do efeito da temperatura no desempenho de pavimentos flexíveis. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 4, n. 1, 2017. <https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v4n1p3-18>
- DESPINI, F. et al. Urban surfaces analysis with remote sensing data for the evaluation of UHI mitigation scenarios. **Urban Climate**, v. 35, 1 jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100761>
- GETIS, A.; ORD, J. K. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. **Geographical analysis**, v. 24, n. 3, p. 189–206, 1992. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- IPCC. **Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]**. (P. Arias et al., Eds.). Geneva, Switzerland: [s.n.]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 23 abr. 2024.
- LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da paisagem com SIG**. Oficina de Textos, 2009.
- LUCENA, A. J. DE et al. Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro. **Theor Appl Climatol**, v. 111, p. 497–511, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0668-0>
- LUKANEN, E. O.; STUBSTAD, R.; BRIGGS, R. Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement. Em: MCLEAN (Ed.). **Turner-Fairbank Highway Research Center**. Federal Highway Administration, United States Department of Transportation, 2000. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/98085a/98085a.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2024.
- NWAKAIRE, C. M. et al. Urban Heat Island Studies with emphasis on urban pavements: A review. **Sustainable Cities and Society**. Elsevier Ltd, 1 dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102476>
- ROUSE, J. et al. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite- 1 Symposium. **Anais...** Washington, DC, USA: 1973. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>. Acesso em: 01 abr. 2024.
- SARROUKH, M. et al. Effect of global warming and new equivalent temperature zoning maps for asphalt pavement design in Morocco. **Energy and Buildings**, v. 303, 15 jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113820>.
- SILVA, A. G. L.; TORRES, M. C. A. Proposing an effective and inexpensive tool to detect urban surface temperature changes associated with urbanization processes in small cities. **Building and Environment**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107634>.
- SONG, Y. et al. Segment-based spatial analysis for assessing road infrastructure performance using monitoring observations and remote sensing data. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, 1 nov. 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10111696>.



Alline Gomes Lamenha e Silva,
Mônica Regina Garcez, Cecília Fortes Merighi,
Gracieli Bordin Colpo & Lélío Antônio Teixeira Brito

THACKER S et al. **Infrastructure for climate action**. Copenhagen, Denmark. 2021. Disponível em: https://content.unops.org/publications/Infrastructure-for-climate-action_EN.pdf?mtime=20211008124956&focal=none. Acesso em: 24 abr. 2024.

VINCENT, A.; SUSHAMA, L. City-scale modelling of road thermal and hydrologic characteristics and failure mechanisms: Case study of Montreal. **Sustainable Cities and Society**, p. 105484, abr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105484>.

WANG, Y.; BERARDI, U.; AKBARI, H. Comparing the effects of Urban Heat Island Mitigation Strategies for Toronto, Canada. **Energy & Buildings**, v. 114, p. 2–19, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>.

YAO, L. et al. Adaptive maintenance strategies to mitigate climate change impacts on asphalt pavements. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 126, 1 jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.104026>.



DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO COMO ESTRATÉGIA DE GOVERNANÇA DE DADOS NO SETOR DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA NO BRASIL

*Mônica Regina Garcez¹; Cecília Fortes Merighi²; Susan Mayumi Palu³; Gracieli Bordin Colpo⁴
Luiz Manoel Souza⁵ & Lélío Antônio Teixeira Brito⁶*

RESUMO

Este trabalho pretende contribuir com a demanda por ações de curto prazo para a implementação de planos de negócios orientados a práticas ESG (Environmental Social Governance) através de uma discussão sobre adoção de DAP (Declaração Ambiental de Produto) como estratégia de governança de dados para o setor de infraestrutura rodoviária no Brasil. A partir dos dados selecionados para uma mistura asfáltica de referência foi desenvolvida uma ACV (Análise de Ciclo de Vida) para embasar discussões que auxiliem na compreensão do processo para geração dos dados para DAP bem como na interpretação crítica dos resultados declarados. Os resultados e discussões mostram que as DAP são uma ferramenta importante em práticas ESG para orientar iniciativas estratégicas em diferentes níveis, auxiliar nos processos de tomada de decisão e projetar modelos de negócios que atendam aos requisitos de sustentabilidade para infraestrutura rodoviária. Entretanto, atenção no seu uso deve ser dada como forma de contribuir às práticas sustentáveis evitando os riscos associados ao *greenwashing*. As discussões reforçam que conhecimento técnico sobre o desenvolvimento das DAP e análise crítica das informações declaradas é fundamental para tomadas de decisão sobre potenciais impactos das misturas asfálticas declaradas.

PALAVRAS-CHAVE: ESG; impactos ambientais; misturas asfálticas; declaração ambiental de produto.

ABSTRACT

This paper aims to contribute to the demand for short-term actions to implement ESG (Environmental Social Governance) practices in business models for the paving sector in Brazil by discussing the role of EPD (Environmental Product Declarations) as a governance strategy. An LCA (Life Cycle Assessment) developed for a reference mixture supports the discussions about the process for generating data and a critical interpretation of the values declared in an EPD. The results and discussions highlight the role of EPD as a tool in ESG practices to guide strategic initiatives at different levels, assist in decision-making processes, and design business models that meet sustainability requirements for road infrastructure. However, it is important to exercise caution when using EPDs as part of sustainable practices to prevent the risk of greenwashing. The discussions highlight that technical knowledge about the development and critical analysis of the declared information is fundamental for making decisions about the potential impacts of the declared asphalt mixtures.

KEYWORDS: ESG; climate change; environmental impacts; asphalt mixtures; environmental product declaration.

^{1, 3, 6} Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em engenharia Civil – Construção e Infraestrutura, Laboratório de Pavimentação, monica.garcez@ufrgs.br; susan.palu@ufrgs.br; lelio.brito@ufrgs.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em engenharia Civil – Construção e Infraestrutura, Laboratório de Pavimentação; Grupo EcoRodovias, cecilia.merighi@ecorodovias.com.br

⁴ Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Escola Politécnica, gracieli.colpo@puers.br

⁵ Grupo EcoRodovias, luiz.souza@ecoviasdoaraguaia.com.br



INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico que o país experimentou nas últimas duas décadas aumentou o transporte de cargas pelo modal rodoviário. Considerando que o setor é responsável por importante parcela de emissões de gases de efeito estufa (Figura 1) é notável o potencial da infraestrutura rodoviária em contribuir com cumprimento de metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas em 2015. No Brasil, as estradas pavimentadas representam 12% dos 1.720.909km da malha rodoviária, com 23.238 km administrados por concessionárias privadas. Com milhares de quilômetros ainda não pavimentados e apenas 34% da rede classificada como em boas ou excelentes condições de tráfego (CNT, 2022), há necessidade urgente de operações de construção e manutenção, o que significa uma oportunidade para implementar práticas para reduzir os impactos associados.

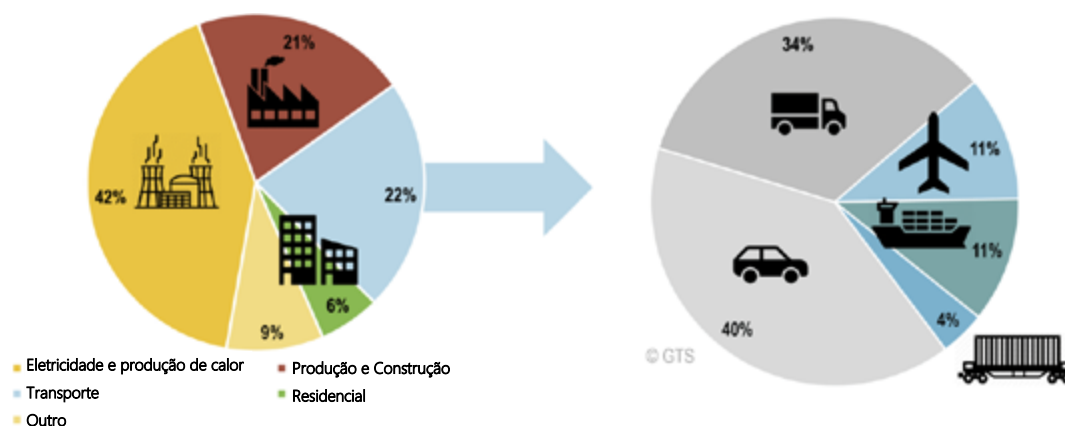


Figura 1. Emissões de gases de efeito estufa pelo setor de transportes a nível global (IPCC, 2014).

Uma interessante projeção do painel dos ODS publicado recentemente no Relatório do Desenvolvimento Sustentável (SACHS et al., 2023), na forma de painéis interativos (Figura 2), mostra o desempenho do Brasil frente aos desafios de atingir as metas estipuladas na Agenda 2030. É notável que, apesar dos bons indicadores relacionados à energia limpa e acessível, que envolvem desde o acesso da população à eletricidade e energia limpa até a porcentagem de CO₂ emitido pela combustão de combustível por quantidade de energia gerada, desafios ainda precisam ser transpostos com relação à ação contra mudanças climáticas. Neste ponto, o transporte rodoviário pode contribuir de forma significativa, uma vez que os indicadores remetem à emissão de CO₂ pela queima de combustíveis fósseis e produção de cimento asfáltico de petróleo (CAP), bem como às emissões de CO₂ incorporadas nas exportações de combustíveis fósseis.

A resiliência climática desempenha um papel predominante no desenho e operação dos ativos de infraestrutura e, considerando a crescente demanda por transporte rodoviário, aliada ao aumento das vulnerabilidades oriundas de eventos extremos de temperatura e precipitação, os evidentes impactos na infraestrutura existente não podem ser negligenciados. A demanda por ações voltadas à sustentabilidade na infraestrutura rodoviária está diretamente relacionada com os impactos ambientais oriundos dos materiais de pavimentação utilizados, métodos de dimensionamento, técnicas construtivas empregadas e à operação das vias.



DOI: 10.29327/1430212.49-59

DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO COMO ESTRATÉGIA DE GOVERNANÇA DE DADOS NO SETOR DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA NO BRASIL

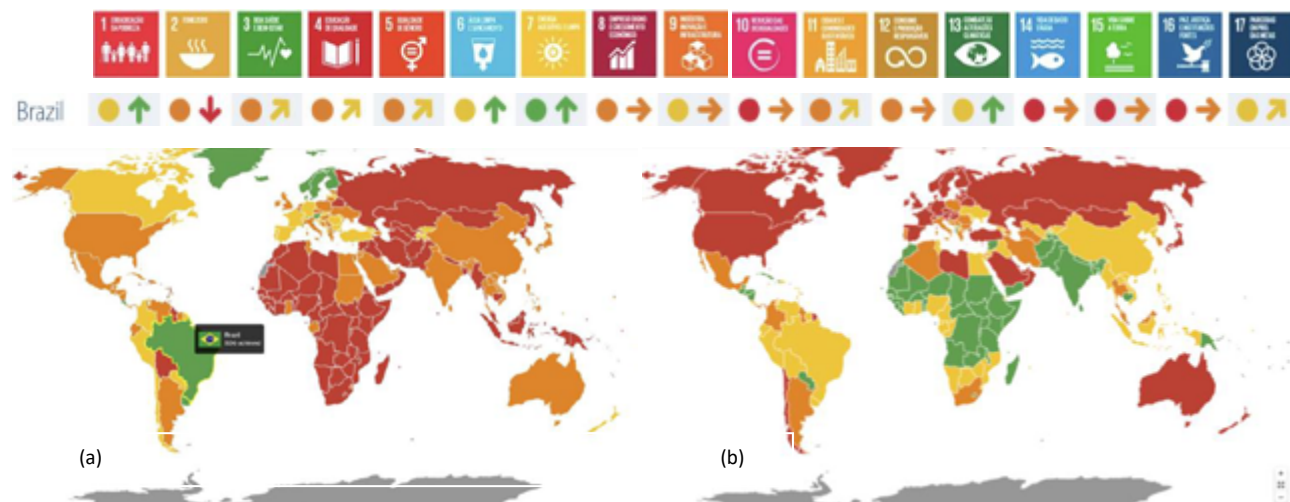


Figura 2. Projeção de indicadores relativos aos ODS: (a) Energia limpa e acessível; (b) Ação contra mudança climática (Sachs *et al.*, 2023).

Nesta linha, o Brasil precisa avançar na implementação de práticas voltadas à sustentabilidade na infraestrutura rodoviária, entendendo, identificando e fomentando a redução de impactos ambientais e energia incorporada relacionados à pavimentação rodoviária.

Embora pontuais avaliações dos aspectos de sustentabilidade vêm sendo implementadas de forma incipiente no país, existe uma forte demanda por ações mais robustas relacionadas à quantificação e monitoramento de impactos ambientais por parte das concessionárias de rodovias e órgãos federais e estaduais. Em geral, a sustentabilidade no âmbito da infraestrutura rodoviária é abordada, no Brasil, através da busca pela redução de consumo energético nas etapas de produção e operação, maior longevidade dos pavimentos e no monitoramento de emissões (por exemplo VOC e fumos de asfalto). Mais recentemente tem sido considerada a perspectiva do potencial de aquecimento global e, de forma ainda incipiente, vem crescendo a busca pela publicação de declarações ambientais de produto (DAP) como ferramenta de comunicação de impactos. No âmbito dos três pilares da sustentabilidade (econômico, social e ambiental), garantir a qualidade de vida das pessoas por meio do bem-estar social e econômico exige mais do que a busca por materiais de baixo carbono para reduzir as emissões. A quantificação dos impactos ambientais relacionados à toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, esgotamento de recursos abióticos, uso da terra, e energia incorporada, também é extremamente relevante e demanda uma abordagem mais ampla.

Este trabalho pretende contribuir com a demanda por ações imediatas para a implementação de planos de negócios orientados para práticas ESG (Environmental Social Governance) através de uma discussão sobre adoção de DAP como estratégia de governança de dados para setor de pavimentação rodoviária no Brasil. Para efetivamente contribuir no apoio a tomada de decisões que contemplem aspectos de sustentabilidade, o trabalho foi concebido de forma a refletir ao máximo o contexto brasileiro, em termos de materiais, processos, legislação e matriz energética.

DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO

Uma DAP é um documento que declara de forma transparente e verificada os impactos ambientais de um produto, servindo como ferramenta de comunicação de impactos, subsídio a tomada de



decisões gerenciais sobre processos produtivos, bem como a identificação da contribuição de cada fluxo do processo produtivo nas emissões totais do produto.

Segundo a NBR ISO 14020 (ABNT, 2022), a DAP é uma rotulagem ambiental do Tipo III cujos requisitos são prescritos pela NBR ISO 14025 (ABNT, 2015). A rotulagem ambiental do Tipo I especificada na NBR ISO 14024 (ABNT, 2022), se refere a Rótulos Ecológicos (Selos Verdes, por exemplo), enquanto a do Tipo II, especificada na NBR ISO 14021 (ABNT, 2018) corresponde a Autodeclarações (informações constantes em rótulos de produtos, por exemplo). Ao contrário das rotulagens do Tipo I e II, as DAP são produzidas a partir de dados obtidos por meio de uma ACV (Análise de Ciclo de Vida), seguindo as especificações de um documento denominado RCP (Regra de Categoria de Produto), conforme ilustra a Figura 3.

Norma ISO	ISO 14024	ISO 14021	ISO 14025
Programa de Declaração Ambiental	✓	✓	✓
Envolvimento das Partes interessadas	✓		✓
Informações de Suporte	✓	✓	✓
ACV baseada em uma RCP			✓
Avaliação de conformidade	✓		✓
Documentação Comprobatória	✓	✓	✓

Figura 3. Tipos de rotulagem ambiental segundo a NBR ISO 14020 (ABNT, 2022).

A Figura 4 mostra o fluxo a ser percorrido para a publicação de uma DAP. Inicialmente é selecionado um Operador do Sistema, que, para misturas asfálticas, pode ser o *National Asphalt Pavement Association - NAPA* (EUA), o *Envirodec - International EPD (Environmental Product Declaration) System* (Europa), ou o *EPD Brasil* (Brasil – parte do *International EPD System*), por exemplo. A partir de então, se define qual Regra de Categoria de Produto (RCP) será utilizada para a elaboração da DAP.



Figura 4. Fluxo para registro a publicação de uma DAP.

A RCP, segundo a NBR ISO 14025 (ABNT, 2015), contém requisitos e diretrizes para desenvolver a DAP, de forma a garantir a consistência e comparabilidade dos dados declarados. Neste sentido, a ISO 21930 (ISO, 2017) e a BS EN 15804:2012 + A2:2019 (CEN, 2021) contém regras centrais para elaboração das RCP de produtos de construção. A RCP descreve todos os componentes metodológicos relevantes que devem constar na DAP, desde os dados necessários para o detalhamento do produto (função/desempenho/uso), até detalhes da ACV como determinação do objetivo e escopo, incluindo a unidade funcional e declarada para o produto, fronteiras do sistema, métodos de coleta de dados e procedimentos de cálculo e alocação. Na RCP também constam os impactos ambientais que devem ser declarados. A partir da escolha da RCP é desenvolvida uma ACV para originar os dados que constarão na DAP, de acordo com o método de análise de impacto especificado na RCP. Na ACV são utilizados dados de entrada primários (*foreground data*) e



DOI: 10.29327/1430212.49-59

DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO COMO ESTRATÉGIA DE GOVERNANÇA DE DADOS NO
SETOR DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA NO BRASIL

secundários (*background data*), estes últimos obtidos a partir de bancos de dados desenvolvidos especificamente para ACV.

É interessante observar que pode haver uma diferenciação em termos de escopo para DAP geradas para um determinado produto, devido às fases do ciclo de vida que estão contempladas na ACV. As normas ISO 21930 (ISO, 2017) e BS EN 15804:2012 + A2:2019 (CEN, 2021) detalham módulos de análise (Figura 5) a serem considerados no desenvolvimento de uma ACV para geração de DAP: Produção (A1 a A3), Construção (A4 e A5), Uso (B1 a B7) e fim de vida (C1 a C4).

Produção			Construção		Uso							Fim de vida				Além das Fronteiras do Sistema
Matéria-prima	Transporte	Produção	Transporte	Construção	Uso	Manutenção	Reparo	Reabilitação	Reforma	Uso de energia	Uso de água	Demolição	Transporte	Processamento do resíduo	Descarte	Potencial reuso, recuperação e/ou reciclagem
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI

Figura 5. Módulos de análise da ISO 21930 (ISO, 2017) e BS EN 15804:2012 + A2:2019 (CEN, 2021).

Uma DAP, segundo a ISO 21930 (ISO, 2017) deve se basear, no mínimo, em uma análise berço ao portão, em dados correspondentes ao estágio de Produção (módulos A1-A3), mas podem também conter dados de outros módulos. Dentre os escopos possíveis estão o berço ao portão (produção), berço ao portão com opção de inclusão de módulos selecionados de outras etapas (construção, uso e fim de vida) ou berço ao túmulo, em que todos os módulos são incluídos. A BS EN 15804:2012 + A2:2019 (CEN, 2021) também inclui os módulos A4, C1-C4 e D como mandatórios para emissão de uma DAP do berço ao portão.

A definição dos módulos a serem declarados na DAP depende da RCP escolhida: a *RCP for Asphalt Mixtures* desenvolvida pelo NAPA para uso nos EUA (válida até 2027), por exemplo, segue a ISO 21930 (ISO, 2017) e utiliza um método de análise de impactos denominado TRACI (*Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other environmental Impacts*), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos baseado nas condições regionais do país, enquanto a *NPCR 025 Part B for Asphalt* utilizada na Europa e desenvolvida pela *EPD Norge* (válida até 2027) segue a BS EN 15804:2012 + A2:2019 (CEN, 2021) e utiliza um método de análise de impactos denominado EN 15804 + A2.

É muito importante ressaltar que as DAP com módulos declarados A1-A3 não podem ser usadas para comparação entre diferentes produtos, a não ser que as misturas asfálticas comparadas, por exemplo, atendam a critérios de desempenho e de projeto semelhantes.

A partir dos dados obtidos por meio da ACV a DAP pode ser formatada e, antes de ser publicada, deve ser verificada por uma terceira parte.

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT 2022) o desenvolvimento de uma ACV inicia pela definição do objetivo e escopo, para que então seja elaborado um inventário do ciclo de vida e determinados os potenciais impactos ambientais.



O objetivo e escopo para o desenvolvimento da DAP utilizada para embasar as discussões apresentadas neste trabalho foram assim definidos:

- **Unidade declarada:** 1 tonelada métrica de mistura asfáltica de referência.
- **Fronteiras do sistema:** Berço ao portão (*cradle-to-gate*), abrangendo os módulos mínimos A1-A3 requeridos pela ISO 21930 (ISO, 2017), conforme ilustrado na Figura 6. O módulo Materiais (A1) inclui a extração e manufatura das matérias-primas, o módulo Transporte (A2) engloba o transporte das matérias-primas até a usina, e o módulo Produção (A3) compreende as operações da usina relativas à produção da mistura asfáltica (Figura 7).

A determinação dos impactos ambientais se baseou em dados levantados por meio do inventário de ciclo de vida, atendendo aos módulos de análise A1, A2 e A3, conforme escopo definido para a DAP. Considerando que a ACV, por concepção, é sensível ao contexto, a construção dos fluxos correspondentes ao inventário do ciclo de vida corresponde, neste trabalho, a uma mistura asfáltica produzida em usina localizada na cidade de Gurupi-TO. A usina fornece concreto asfáltico para obras de duplicação de um trecho de rodovia na transição do complexo Regional do Centro-Sul e Amazônia. A conjuntura analisada foi selecionada devido a importância da região no contexto ambiental

no

Brasil.

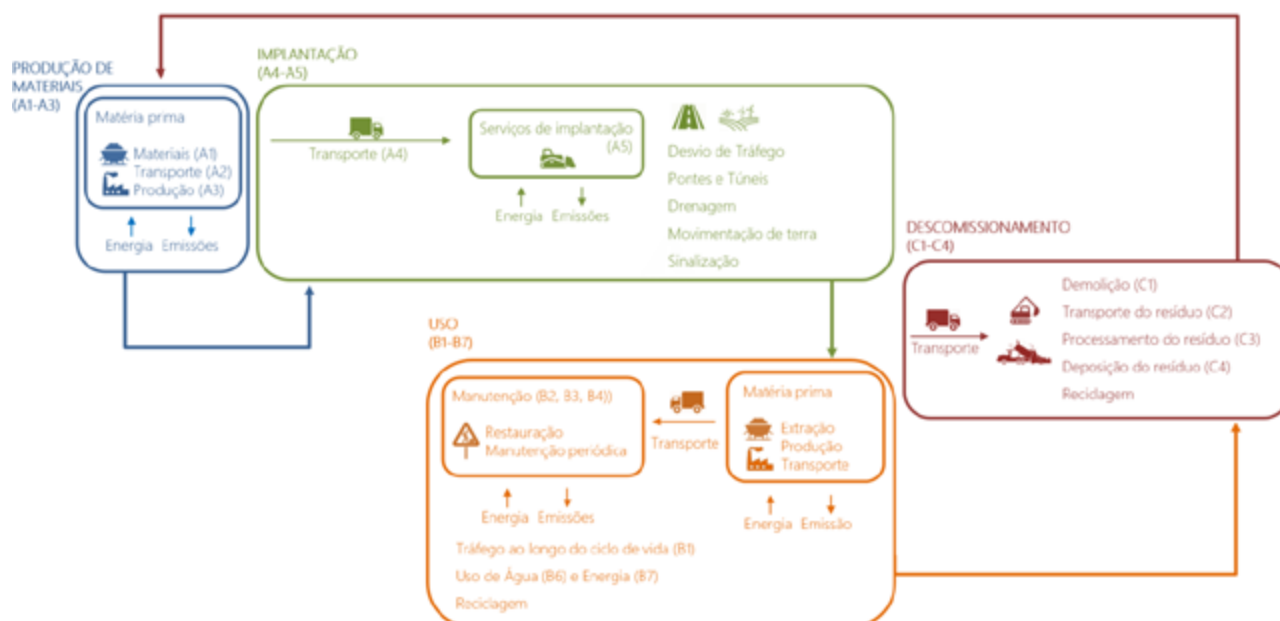


Figura 6. Fases do ciclo de vida de um pavimento e módulos de análise.

- **Dados primários (foreground data):** quantitativos da mistura, energia despendida para produção, localização dos fornecedores de materiais para cálculo das distâncias de transporte (Tabelas 1 a 3).
- **Dados secundários (background data):** base de dados Ecoinvent versão 3.9.1, com utilização de provedores que refletem o cenário brasileiro (Tabela 4), compatível com o Software OpenLCA, utilizado na análise, que possui uma aplicação adicional para desenvolvimento de DAP no âmbito da BS EN 15804:2012 + A2:2019 (CEN, 2021).



DOI: 10.29327/1430212.49-59

DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO COMO ESTRATÉGIA DE GOVERNANÇA DE DADOS NO
SETOR DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA NO BRASIL

Figura 7. Escopo da DAP.

Tabela 1. Fluxos e dados primários para produção de 1t métrica de mistura asfáltica.

Saída	Entrada	Quantidade	Módulo
	Produção CAP	0,044t	A1
	Transporte CAP da refinaria para a distribuidora	0,331 t.km	A2
	Consumo energia por diesel para aquecimento do caminhão no trajeto entre a refinaria e a distribuidora	0,015 kWh	A2
	Transporte CAP da distribuidora para a usina	58,377 t.km	A2
	Consumo energia por diesel para aquecimento do caminhão no trajeto entre a distribuidora e a usina	2,735 kWh	A2
1t de mistura asfáltica	Extração de agregados na pedraira	0,942t	A1
	Consumo energia por diesel para usinagem de brita graduada	0,963 kWh	A1
	Consumo energia por eletricidade para usinagem de brita graduada	0,138 kWh	A1
	Transporte agregado da pedraira para a usina	16,016 t.km	A2
	Produção filler	0,014t	A1
	Transporte filler do fornecedor para a usina	18,962 t.km	A2
	Consumo energia por diesel	4,715 kWh	A3
	Consumo energia por eletricidade	2,610 kWh	A3

Tabela 2. Detalhamento da mistura.

Componente	Descrição/Origem	Teor (%)	Distância de Transporte
Brita 3/4"	Granito/Gurupi-TO	19,13	17km
Brita 3/8"	Granito/Gurupi-TO	34,91	17km
Pó de pedra 3/16"	Granito/Gurupi-TO	40,17	17km
Cal Hidratada	CH1/São José da Lapa-MG	1,43	1326km
CAP	CAP 30/45/Betim-MG	4,35	1350km

Especificação DNIT 031/2006 ES; Tipo de Gradação: EGL 16-19,0mm; Dosagem Marshall



Tabela 3. Dados da usina por tonelada de mistura asfáltica.

Consumo Energético para produção da mistura	
Consumo de Energia (diesel) para produção da mistura asfáltica	4,72kWh
Consumo de Energia (eletricidade) para produção da mistura asfáltica	2,61kWh
Consumo de Energia (diesel) para usinagem da brita graduada	0,96kWh
Consumo de Energia (eletricidade) para usinagem da brita graduada	0,14kWh

Tabela 4. Provedores de dados secundários da base de dados Ecoinvent (versão 3.9.1).

Provedores do Ecoinvent 3.9.1

- pitch production, petroleum refinery operation |pitch| Cutoff, U – BR
- gravel production, crushed | gravel, crushed | Cutoff, U - BR
- sand to generic market for inert filler |inert filer| Cutoff, U - GLO
- transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cutoff, U - BR
- electricity voltage transformation from high to medium voltage | electricity, medium voltage | Cutoff, U - BR - Northern grid
- electricity voltage transformation from high to medium voltage | electricity, medium voltage | Cutoff, U - BR - South-eastern grid
- diesel, burned in building machine |diesel, burned in building machine| Cutoff, U – GLO

O método de análise de impacto utilizado foi o EN 15804+A2. Com relação aos impactos ambientais mandatórios são considerados os seguintes indicadores: potencial depleção abiótica (elementos/fósseis), potencial acidificação, potencial eutrofização (água doce/marinha/terrestre), potencial aquecimento global (biogênico/fóssil/uso do solo/total), potencial de depleção do ozônio, potencial criação fotoquímica de ozônio e potencial privação de água. Como impactos ambientais adicionais são determinados o potencial ecotoxicidade (água doce), toxicidade humana (cancerígena/não cancerígena), radiação ionizante (saúde humana), uso do solo e mudança no uso do solo e formação de material particulado (incidência de doenças). Os impactos oriundos do uso de recursos são quantificados pelos seguintes indicadores: energia primária renovável e não renovável e uso líquido de água doce. Quanto aos resíduos, são quantificados resíduos perigosos e não perigosos descartados e resíduos radioativos descartados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com o desenvolvimento da ACV para o caso em questão se referem a uma mistura de referência, embora o método apresentado em detalhes neste trabalho possa ser ajustado para diferentes aplicações. A análise dos resultados está organizada para auxiliar na compreensão do processo para geração dos dados para DAP bem como na interpretação crítica dos resultados.

Os dados apresentados na Tabela 5 mostram os potenciais impactos quantificados para cada módulo da etapa de produção da mistura asfáltica de referência, cujos percentuais correspondentes são mostrados nas Figuras 8 (impactos mandatórios) e 9 (impactos adicionais, geração de resíduos e utilização de recursos energéticos).

Os resultados da Figura 8 mostram que, em geral, na produção de materiais a extração da matéria prima (A1) é o principal gerador de impactos ambientais. Entretanto, em três categorias de impacto o transporte (A2) contribui de forma mais significativa: depleção abiótica (elementos), que se refere



DOI: [10.29327/1430212.49-59](https://doi.org/10.29327/1430212.49-59)

DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO COMO ESTRATÉGIA DE GOVERNANÇA DE DADOS NO SETOR DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA NO BRASIL

ao consumo dos recursos naturais não bióticos, aquecimento global (uso do solo) e privação de água. O aquecimento global (uso do solo) se refere às emissões que surgem em conexão com mudanças no estoque de carbono especificado como resultado do uso da terra e da mudança no uso da terra, como CO₂ oriundo combustão de carvão, petróleo e gás, CH₄ emitido na extração de carvão e CO oriundo de processos de combustão incompleta. A depleção abiótica (elementos) se refere ao consumo de recursos não biológicos, como a água, o que corrobora com o resultado encontrado no indicador que remete à privação de água.

A fase de produção (A3) é, claramente, a que menos contribui nos impactos analisados, superando 10% nos indicadores de aquecimento global (biogênico e uso do solo) e privação de água. O aquecimento global (biogênico) se refere a emissão de CO₂ oriundo da decomposição de biomassa por combustão, por exemplo. A matriz energética brasileira, 47,3% oriunda de fontes renováveis (EPE, 2023) é um ponto de destaque com relação às emissões na fase de produção, que poderiam ser superiores caso de maior contribuição de fontes não renováveis.

Como o petróleo é o principal constituinte da mistura asfáltica, é esperado que o módulo A1 seja responsável pela maior porcentagem dos impactos relacionados à depleção abiótica (fósseis), aquecimento global (fóssil e total). Para a mistura em questão, o ligante é responsável por cerca de 50% do CO₂-eq contabilizado no indicador de aquecimento global (total) e representa 90% do potencial de depleção abiótica (fósseis), que é estimado em MJ. É interessante observar também a grande contribuição do módulo A1 nos indicadores de depleção de camada de Ozônio e criação fotoquímica de Ozônio, que é uma forma de poluição do ar que pode ocorrer quando compostos orgânicos voláteis não-metano (NMVOC) e NO_x na atmosfera reagem quimicamente entre si devido à radiação solar.

O indicador de eutrofização (água doce, marinha e terrestre) também é mais influenciado pelos materiais (A1). A eutrofização reflete o aumento da produção vegetal causado pelo aumento do fornecimento de nutrientes, que leva a um aumento na produção primária de algas planctônicas e subsequente perda de oxigênio e decomposição de biomassa. A eutrofização terrestre considera a entrada de Nitrogênio pelo ar (NH₃ e NO_x) e reflete a área em que a capacidade de suporte dos ecossistemas é excedida, bem como a extensão da excedência. Os processos de combustão em usinas de geração de energia e o transporte são importantes fontes de emissões de N, que causam impactos relacionados a eutrofização. O SO₂, NH₃ e NO_x, oriundos da combustão de óleos combustíveis pesados e das emissões de enxofre em atividades industriais, são os compostos que mais contribuem para a acidificação, cujos efeitos danificam lagos e rios com efeitos letais sobre algas, peixes e microrganismos. Além de contribuir para a dissolução de nutrientes importantes como o potássio e o cálcio, tornando-os menos acessíveis às plantas, a acidificação, cuja principal contribuinte é a fase de produção dos materiais (A1), também proporciona a dissolução e aumento da disponibilidade de metais tóxicos, como alumínio e mercúrio.

Os impactos não mandatórios (Figura 9), ou adicionais, são aqueles mais relacionados à saúde e qualidade de vida das pessoas. Estes indicadores são fortemente afetados tanto pelo refino do petróleo quanto pela e queima de combustíveis fósseis. Os resultados corroboram os já discutidos para a Figura 8, com o Módulo A2 contribuindo de forma mais significativa naqueles relacionados com uso e mudança no uso do solo e questões relacionadas à água, aqui quantificada em termos de ecotoxicidade (água doce). Caberia aqui uma reflexão quanto à não serem mandatórios aspectos que afetem a saúde e qualidade de vida das pessoas, que poderiam ser bons indicadores relativos ao



Mônica Regina Garcez, Cecília Fortes Merighi,
Susan Mayumi Palu, Gracieli Bordin Colpo,
Luiz Manoel Souza & Lélío Antônio Teixeira Brito

pilar social da sustentabilidade. Com relação aos impactos oriundos da geração de resíduos e uso de recursos para geração de energia é notável a maior contribuição do Módulo A1.

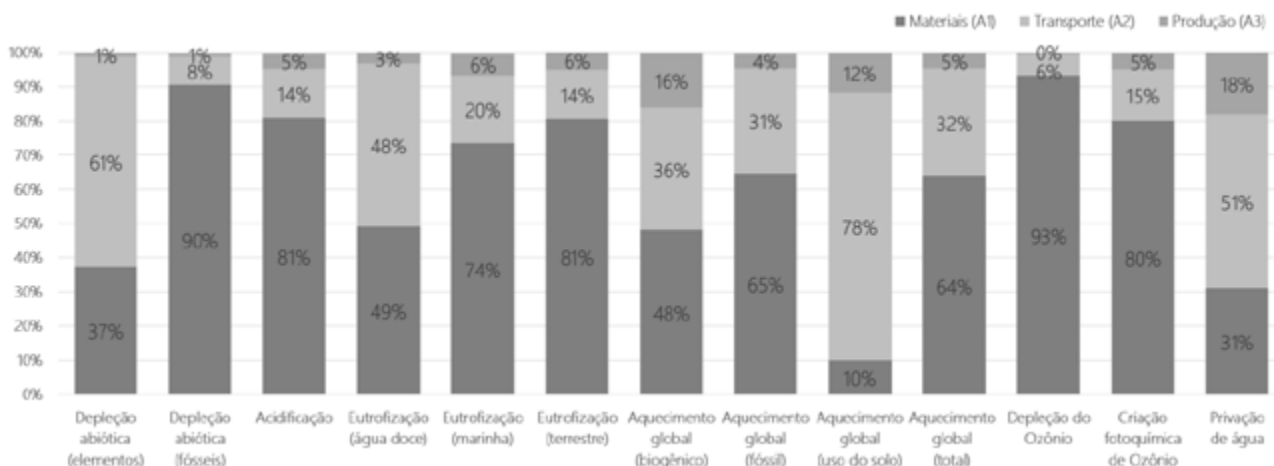


Figura 8. Potenciais impactos mandatórios para emissão da DAP para a mistura de referência.

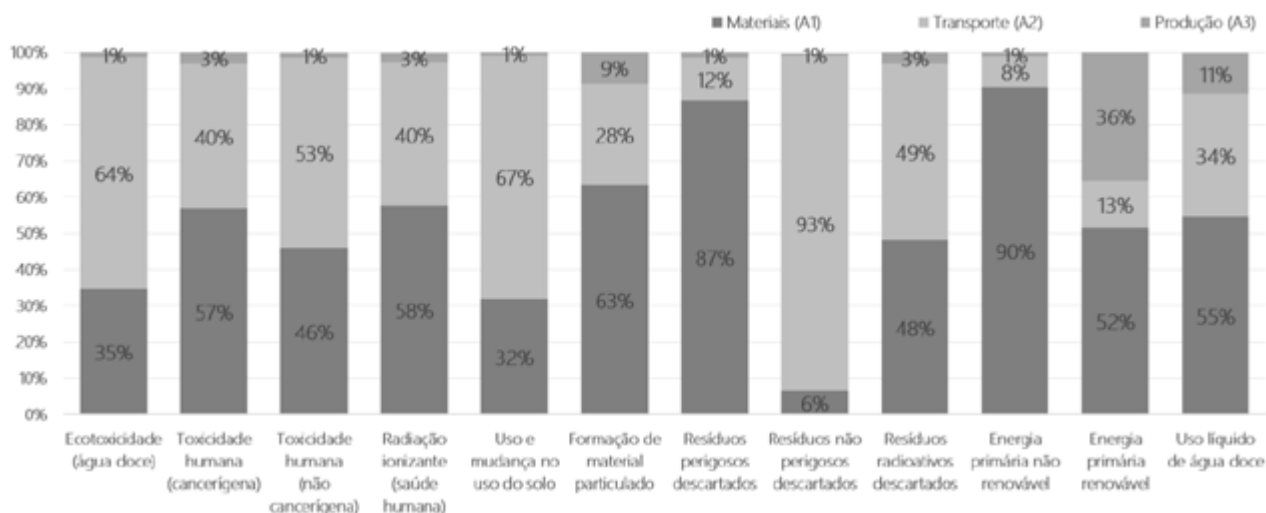


Figura 9. Impactos adicionais, geração de resíduos e utilização de recursos energéticos para a mistura de referência.

É interessante notar que uma redução simulada de 50% na distância de transporte do ligante da distribuidora até a usina (Módulo A2) resultaria em importante diminuição nos indicadores de aquecimento global (cerca de 10%) e depleção abiótica - elementos (cerca de 20%).

Os impactos aqui discutidos para a mistura referência, como se referem aos módulos declarados A1-A3 não podem ser usados para comparação com outras misturas asfálticas, a não ser que estas atendam mesmos critérios de desempenho e sejam utilizadas em aplicações semelhantes. Neste ponto, cabe salientar que uma eventual exigência de publicação de DAP para misturas asfálticas com módulos mínimos A1-A3 (berço ao portão), que atenderia os módulos mínimos especificados na ISO 21930 (ISO, 2017), já seria um primeiro e importante passo dentro de práticas ESG no Brasil. Uma prática comum em países mais avançados na implementação de práticas voltadas à sustentabilidade na pavimentação rodoviária é que a emissão de DAP para misturas asfálticas conte créditos ambientais em sistemas de classificação verde.



DOI: 10.29327/1430212.49-59

DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO COMO ESTRATÉGIA DE GOVERNANÇA DE DADOS NO
SETOR DE PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA NO BRASIL

Tabela 5. Quantificação dos potenciais impactos por tonelada de mistura asfáltica pelo Método EN 15804+A2.

Método EN 15804+A2	Total (por t)	Materiais (A1)	Transporte (A2)	Produção (A3)
Impactos mandatórios				
Depleção abiótica - elementos (kg Sb eq)	7,62E-05	2,85E-05	4,68E-05	8,27E-07
Depleção abiótica – fósseis (MJ net calorific)	2,31E+03	2,09E+03	1,92E+02	2,50E+01
Acidificação (mol H+ eq)	3,62E-01	2,93E-01	5,18E-02	1,64E-02
Eutrofização - água doce (kg P eq)	2,20E-03	1,08E-03	1,05E-03	6,97E-05
Eutrofização - marinha (kg N eq)	1,14E-01	8,38E-02	2,26E-02	7,36E-03
Eutrofização – terrestre (mol N eq)	1,39E+00	1,12E+00	1,99E-01	8,00E-02
Aquecimento global – biogênico (kg CO ₂ eq)	5,24E-01	2,52E-01	1,87E-01	8,46E-02
Aquecimento global – fóssil (kg CO ₂ eq)	4,36E+01	2,82E+01	1,34E+01	1,91E+00
Aquecimento global - uso do solo (kg CO ₂ eq)	6,34E-01	6,36E-02	4,96E-01	7,44E-02
Aquecimento global - total (kg CO ₂ eq)	4,47E+01	2,85E+01	1,41E+01	2,06E+00
Depleção do ozônio (kg CFC-11 eq)	7,83E-06	7,30E-06	4,92E-07	3,34E-08
Criação fotoquímica de ozônio (kg NMVOC eq)	4,83E-01	3,87E-01	7,20E-02	2,39E-02
Privação de água (m ³ world eq)	1,85E+01	5,75E+00	9,39E+00	3,37E+00
Impactos adicionais				
Ecotoxicidade - água doce (CTUe)	8,43E+02	2,92E+02	5,41E+02	1,09E+01
Toxicidade humana - cancerígena (CTUh)	1,75E-08	9,95E-09	6,99E-09	5,84E-10
Toxicidade humana - não cancerígena (CTUh)	3,54E-07	1,63E-07	1,86E-07	4,59E-09
Radiação ionizante - saúde humana (kBq U235 eq)	4,37E-01	2,52E-01	1,73E-01	1,17E-02
Uso do solo e mudança no uso do solo (-)	2,33E+02	7,43E+01	1,57E+02	2,02E+00
Formação de material particulado (incid. doenças)	5,18E-06	3,28E-06	1,46E-06	4,42E-07
Geração de resíduos				
Resíduos perigosos descartados (kg)	1,13E-02	9,80E-03	1,34E-03	1,64E-04
Resíduos não perigosos descartados (kg)	1,38E+01	8,82E-01	1,28E+01	8,58E-02
Resíduos radioativos descartados (kg)	8,47E-05	4,08E-05	4,13E-05	2,70E-06
Uso de recursos energéticos				
Energia primária: Não renovável (MJ)	2,31E+03	2,09E+03	1,96E+02	2,50E+01
Energia primária: Renovável (MJ)	2,95E+01	1,52E+01	3,80E+00	1,06E+01
Uso líquido de água doce (m ³)	6,92E-01	3,78E-01	2,35E-01	7,86E-02

Um aspecto relevante quanto aos dados gerados é que o método de análise impacto EN 15804+A2, utilizado para gerar os dados apresentados nas Figuras 8 e 9, possui ainda dois indicadores que são denominados teor de carbono biogênico (produzido não por combustíveis fósseis, mas naturalmente, por decomposição de resíduos, por exemplo) e fluxos de saída (componentes para reutilização, energia exportada - elétrica e térmica) e materiais para recuperação de energia). Estes itens apareceriam zerados em uma DAP para a mistura em questão, por não se aplicarem ao contexto da produção da mistura asfáltica.

É necessário que haja uma reflexão crítica sobre o fato de que uma DAP A1-A3 não fornece informações em relação aos impactos da mistura asfáltica aplicada em um pavimento ao longo da vida sua útil, uma vez que não considera o desempenho da mistura. Neste sentido, em um segundo momento, a partir de uma cultura de declaração de emissões, que ainda precisaria ser implementada no Brasil, pode-se ampliar o escopo incluindo mais fases do ciclo de vida, para que assim a prática seja realmente utilizada como uma ferramenta de governança de dados pelas agências e empresas concessionárias de rodovias, especialmente no Brasil. Algumas RCP, como a *NPCR 025 Part B for*



Asphalt desenvolvida pela *EPD Norge* (válida até 2027) e muito utilizada na Europa, já inclui como módulos obrigatórios nas DAP de misturas asfálticas o A4 (transporte da usina até o trecho), C1-C4 (descomissionamento) e D (potencial de recuperação e reciclagem). Fica evidente, portanto, a necessidade de adoção de uma RCP adequada ao contexto das misturas asfálticas produzidas no Brasil, que considere módulos de análise factíveis de serem contabilizados (A1-A3 ou A1-A3 com opções de mais módulos, por exemplo) em conjunto com um método de análise de impactos abrangente e bem aceito a nível mundial (EN 15804+A2, por exemplo).

Finalmente, a partir dos dados obtidos por meio da ACV, como os discutidos ao longo deste texto, considerando os módulos de análise exigidos na RCP adotada, a DAP pode ser formatada e, antes de ser publicada, deve ser verificada por uma terceira parte.

CONCLUSÕES

As DAP são uma ferramenta importante em práticas ESG para orientar iniciativas estratégicas em diferentes níveis, auxiliar nos processos de tomada de decisão e projetar modelos de negócios que atendam aos requisitos de sustentabilidade para infraestrutura rodoviária. Entretanto, não podem ser utilizadas indiscriminadamente sob pena de contribuir com práticas nocivas de *greenwashing*.

O conhecimento técnico sobre o desenvolvimento das DAP e análise crítica das informações declaradas é fundamental para tomadas de decisão sobre potenciais impactos das misturas asfálticas declaradas.

AGRADECIMENTOS

À ANTT pelo financiamento do Projeto RDT, à EcoRodovias e Ecovias do Araguaia por proporcionar o desenvolvimento do projeto e aprofundamento das discussões, ao CNPq pela concessão da bolsa de produtividade da primeira autora e ao LAPAV/UFRGS pela disponibilidade de infraestrutura e comprometimento com o desenvolvimento de pesquisa de ponta no país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT ISO 14020. Rótulos e declarações ambientais - Princípios gerais, ABNT, 2022.
- ABNT ISO 14021. Rótulos e declarações ambientais – Autodeclarações ambientais (Rotulagem do tipo II), ABNT, 2018.
- ABNT ISO 14024. Rótulos e declarações ambientais — Rotulagem ambiental Tipo I — Princípios e procedimentos, ABNT, 2022.
- ABNT ISO 14025. Rótulos e declarações ambientais -Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos, ABNT, 2015.
- ABNT ISO 14040. Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura, ABNT, 2022.
- BS EN 15804 + A2. Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products, CEN, 2021.
- CNT. Pesquisa CNT de rodovias. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2022.
- EPE. Balanço Energético Nacional, Brasília: Ministério de Minas e Empresa de Pesquisa Energética, 2023.
- IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom, and New York: 2014.
- ISO 21930. Sustainability in buildings and civil engineering works - Core rules for environmental product declarations of construction products and services, 2017.
- Sachs, J.D., Lafortune, G., Fuller, G., Drumm, E. Implementing the SDG Stimulus. Sustainable Development Report 2023. Paris: SDSN, Dublin: Dublin University Press, 2023.



FERRAMENTA DE INFRAESTRUTURAS RESILIENTES: PLANEJAMENTO E MONITORAMENTO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Rafael Grinberg Chasles¹; Matheus Amaral Prates¹; Gean Kenid Sifronio Franco¹, Vinicius do Prado Capanema¹, José Luiz Fuzaro Rodrigues¹, Carolina Iris Brasil Mariano¹, Bruna Donegá Alves¹, Daniel Matos¹ & Anderson Barbosa Esteves¹

RESUMO

O clima está mudando devido a ações antropogênicas. As mudanças climáticas estão modificando os padrões de chuva e temperatura no globo e, com isso, influenciando na frequência dos eventos extremos, aumento do nível do mar, nos escorregamentos, incêndios florestais e inundações. Para além das consequências socioambientais e econômicas, as infraestruturas também são afetadas com a mudança do clima. Por isso, é necessário buscar medidas de mitigação e minimização destes impactos. Infraestruturas resilientes são infraestruturas adaptadas, planejadas, operadas e/ou reabilitadas às mudanças climáticas. O presente artigo tem como objetivo apresentar ferramenta em construção, pelo Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER-SP), que cria indicadores ambientais relacionados a vegetação, água, fogo, uso e ocupação do solo, emissões atmosféricas e temperatura de superfície das rodovias do Estado de São Paulo, com dados geoespaciais e de sensoriamento remoto e realiza análises por segmentos homogêneos. Com esta ferramenta é possível observar todos estes indicadores por segmentos homogêneos das rodovias estaduais listados em mapas dinâmicos, tabelas e gráficos. Espera-se que esta ferramenta seja utilizada pelos técnicos, tomadores de decisão, gerenciadores e planejadores, além da comunidade científica e público em geral. Almeja-se que, no desenvolvimento do sistema, sejam aprimoradas as análises e cruzamentos de dados e que haja inclusão de novos dados, como: projeções climáticas, qualidade do ar, áreas queimadas, dados socioeconômicos e de gênero.

PALAVRAS-CHAVE: Infraestruturas Resilientes; Mudanças Climáticas; Sensoriamento Remoto; Geoprocessamento; Eventos Extremos.

ABSTRACT

Climate change, driven by human activities, alters global precipitation and temperature patterns, increasing extreme weather events, sea level rise, and other environmental impacts. Infrastructure, including roadways, is particularly vulnerable to these changes. To address this challenge, resilient infrastructure adapted to climate change is crucial. In this context, the present study aims to introduce a tool developed by DER-SP for monitoring environmental indicators along state highways in São Paulo, Brazil. The tool integrates geospatial and remote sensing data to assess vegetation, water resources, fire risk, land use, atmospheric emissions, and road surface temperature. By providing dynamic maps, tables, and graphs, the tool enables stakeholders, including technicians, decision-makers, managers, planners, and the scientific community, to visualize and analyze environmental indicators for homogeneous segments of the state highways. Future developments of the tool aim to enhance data analysis, incorporate additional datasets such as climate projections, air quality, socioeconomic factors, and gender-related data, and improve accessibility for a broader range of users. This tool represents a valuable contribution to infrastructure resilience planning and climate change adaptation efforts in São Paulo and beyond.

KEY WORDS: Resilient Infrastructures; Climate Change; Remote Sensing; GIS; Extreme Events.

¹ DER-SP – Diretoria de Planejamento (DP) - Coordenadoria de Estudo e Pesquisa (CEP), e-mail: rgchasles@der.sp.gov.br; maprates@der.sp.gov.br, gksfranco@der.sp.gov.br, vpcapanema@der.sp.gov.br, jlfrodrigues@der.sp.gov.br, cibmariano@der.sp.gov.br, bdalves@der.sp.gov.br, dmatos@der.sp.gov.br, andersonesteves@der.sp.gov.br



INTRODUÇÃO

A alteração climática emerge como um dos principais desafios globais do século XXI, acarretando consequências e prejuízos para a sociedade. Para além do aumento da temperatura média global, essas mudanças ocasionam variações no padrão de chuvas, resultando em secas, inundações e escorregamento de terra, além do aumento do nível do mar e do incremento na frequência e intensidade de tempestades e outras adversidades climáticas. Tais eventos podem gerar impactos diretos e indiretos em diversos setores econômicos (BRASIL, 2016) e populações. Um estudo do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) revela um aumento um pouco superior a 50% na frequência dos eventos climáticos extremos no período recente, passaram de 0,2 eventos por ano, entre 1980-2000, para 0,3 eventos, entre 2001 e 2019.

Para além dos setores econômicos e das populações afetadas pelas mudanças climáticas, as infraestruturas estão sendo fortemente afetadas pelos impactos físicos da variabilidade climática e dos eventos extremos. As rodovias desempenham um papel central na estrutura socioeconômica, proporcionando um meio vital de transporte e comércio. No entanto, muitas dessas vias foram concebidas com base em modelos climáticos antiquados, que não refletem mais as condições atuais, onde se assume a condição de estacionalidade, ou seja, constância, no entanto, existe um consenso de que os padrões climáticos estão mudando (IPCC, 2022). Diante desse cenário, é imperativo adotar medidas proativas para mitigar os riscos associados e garantir a resiliência das rodovias frente aos desafios ambientais emergentes. Globalmente, existe enorme lacuna de entendimento sobre a maneira específica e a intensidade que as infraestruturas serão afetadas pelas mudanças do clima, demandando abordagens novas e criativas (BRASIL, 2016).

Além desses impactos na infraestrutura, os impactos da mudança do clima no setor de transportes podem afetar de forma direta ou indireta as condições de deslocamento das pessoas e a distribuição de insumos e de serviços, além de aumentar a probabilidade de ocorrência de acidentes de tráfego (EVANS et al., 2009).

A suscetibilidade ao risco climático das infraestruturas depende de fatores como sua localização, características de sua construção e operação, também das tendências climáticas e da incidência e intensidade dos eventos climáticos extremos. É evidente que o grande desafio é como medir esses componentes (BRASIL, 2016). Diante deste cenário, o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) vem desenvolvendo uma ferramenta de planejamento e monitoramento de infraestruturas resilientes a partir de dados espaciais e de Sensoriamento Remoto para realizar análises ambientais por segmentos homogêneos.

O sistema surge para contribuir com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela ONU, principalmente, do ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura e ODS 13 – Ação contra a Mudança Global do Clima. Especialmente das metas: 9.1 - Desenvolver infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente, incluindo infraestrutura regional e transfronteiriça, para apoiar o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano, com foco no acesso equitativo e a preços acessíveis para todos; 9.4 - Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades; 13.1 - Reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos os países e, 13.2 - Integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais.

Instituições internacionais como o BID oferecem empréstimos para financiar projetos de infraestrutura (resiliente) em países em desenvolvimento, visando torná-los mais preparados para as



DOI: [10.29327/1430212.49-57](https://doi.org/10.29327/1430212.49-57)

FERRAMENTA DE INFRAESTRUTURAS RESILIENTES: PLANEJAMENTO E MONITORAMENTO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

mudanças climáticas. O indicador de Nível 2 avalia o impacto financeiro desses investimentos, que visam fortalecer a capacidade das infraestruturas de resistir a eventos climáticos extremos e reduzir as emissões de carbono. “Investimentos em infraestrutura resiliente referem-se a ativos de infraestrutura que incorporem ou sejam modernizados de modo a incorporar medidas para fortalecer sua capacidade física para suportar os impactos de eventos climáticos extremos, riscos geofísicos, elevações do nível do mar e aumento da temperatura”.

INFRAESTRUTURAS RESILIENTES

A característica definidora da resiliência das infraestruturas implica que seja uma infraestrutura planejada, projetada, construída e operada de uma forma que antecipa, prepara e adapta às mudanças climáticas, podendo suportar, responder e recuperar-se rapidamente das perturbações causadas por estas condições, sendo, a garantia da resiliência das infraestruturas, um processo contínuo.

Infraestruturas resistentes às alterações climáticas reduzem, mas podem não eliminar totalmente o risco de perturbações relacionadas com o clima. (EUFIWACC, 2016):

Avaliar até que ponto as alterações climáticas se traduzem em riscos para a infraestrutura depende da interação dos perigos climáticos com a exposição (localização das infraestruturas) e vulnerabilidade (a propensão ou predisposição para ser afetado) (Agard et al., 2014). Riscos climáticos para infraestrutura podem ser reduzidos construindo em áreas que são menos expostas aos perigos climáticos (por exemplo, evitando novas construções em planícies aluviais), e criando infraestruturas mais capazes de lidar com os impactos climáticos.

A gestão de riscos exige realizar *trade-offs* entre minimização de riscos e custos, onde se torna mais caro e cada vez mais desafiador tecnicamente se preparar para eventos que são muito improváveis de ocorrer. Resiliência significa que os riscos foram considerados e gerenciados para alcançar um nível aceitável de desempenho, dado às informações disponíveis e as capacidades para resistir e recuperar-se de choques (OCDE, 2014).

Esforços para garantir a resiliência do projeto devem ser incorporados em uma abordagem estratégica para a infraestrutura que leva em conta os efeitos diretos e indiretos das alterações climáticas. Esta definição de resiliência climática para infraestruturas centra-se no processo utilizado e nos resultados alcançados para avaliar se os impactos das alterações climáticas foram considerados e, se necessário, gerenciados. Dada a natureza específica do contexto da adaptação climática, as medidas utilizadas para alcançar isso irão variar amplamente e onde alterações são necessárias, elas podem ser agrupadas em duas categorias (EUFIWACC, 2016):

Medidas de adaptação estrutural: por exemplo, mudar a composição das superfícies das estradas para não se deformar em altas temperaturas, construindo paredões ou usando superfícies de pavimentação permeáveis para reduzir o escoamento durante fortes chuvas. Abordagens baseadas em ecossistemas usando infraestrutura natural para projetar adaptação também são alternativas importantes a serem consideradas juntamente com medidas de adaptação estrutural.

Medidas de adaptação gerencial (ou não estrutural): por exemplo, alterar o momento de manutenção para levar em conta a mudança de padrões da procura e da oferta de energia, o investimento em sistemas de alerta precoce ou compra de seguro para enfrentar as consequências financeiras da variabilidade do clima. Estas medidas também podem incluir monitoramento aprimorado das infraestruturas existentes para reduzir o risco de fracasso à medida que as condições climáticas mudam.

O SISTEMA



Rafael Grinberg Chasles, Matheus Amaral Prates, Gean Kenid Sifronio Franco, Vinicius do Prado Capanema, José Luiz Fuzaro Rodrigues, Carolina Iris Brasil Mariano, Bruna Donegá Alves, Daniel Matos & Anderson Barbosa Esteves

O sistema de planejamento e monitoramento de infraestruturas resilientes está sendo desenvolvido em linguagem de programação Python, em processamento em nuvem através do *Google Earth Engine* (GEE) e disponibilizado de forma online. A plataforma GEE possui mais de 100 petas bytes de dados de sensoriamento remoto e dados espaciais com possibilidades de diferentes tipos de análises.



Figura 1. Print da tela inicial do sistema com os dados da malha rodoviária em mapa dinâmico. (AUTOR, 2024).

O sistema tem como objetivo auxílio no planejamento e monitoramento da infraestrutura do estado de São Paulo através de indicadores ambientais como vegetação, água, fogo, uso e ocupação do solo, temperatura de superfície (*Land Surface Temperature - LST*) e emissões atmosféricas. Além de conexões com bancos de dados públicos como da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Agência Nacional das Águas (ANA), Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), Secretaria de Meio Ambiente Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo (SEMIL), entre outros.

Este sistema é direcionado à técnicos especializados, tomadores de decisão, gestores e responsáveis pelo planejamento, comunidade científica e público em geral. Através do sistema é possível observar, de forma dinâmica, e em alguns casos em tempo quase real, indicadores ambientais supracitados.

MATERIAIS

Dados Satelitais

O sistema de planejamento e monitoramento de infraestruturas resilientes em desenvolvimento pelo DER-SP utilizou-se de dados satelitais de fontes de dados públicas e gratuitas, de órgãos e instituições internacionais, entre estes, *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *European Space Agency* (ESA), Google, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo (IDEA-SP) através do DataGEO.

A funcionalidade “Imagens” (Fig. 1) possibilita a visualização de um mosaico imagem de satélite sintética, construída a partir das datas de início e fim do satélite Sentinel-2 (Level-2^a – *Surface Reflectance*), sensor *Multispectral Instrument* (MSI), com 10 metros de resolução espacial nas bandas do visível (RGB) e Infravermelho Próximo (NIR), com cobertura de nuvens máxima definidas pelo usuário (nuvens em imagens de satélite prejudicam a visualização dos alvos terrestres). Com essa



DOI: [10.29327/1430212.49-57](https://doi.org/10.29327/1430212.49-57)

FERRAMENTA DE INFRAESTRUTURAS RESILIENTES: PLANEJAMENTO E MONITORAMENTO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

funcionalidade é possível visualizar como é a resposta espectral da área de análise. Ou seja, é possível identificar alvos como vegetação, pastagem, área construída, solo exposto, água etc.

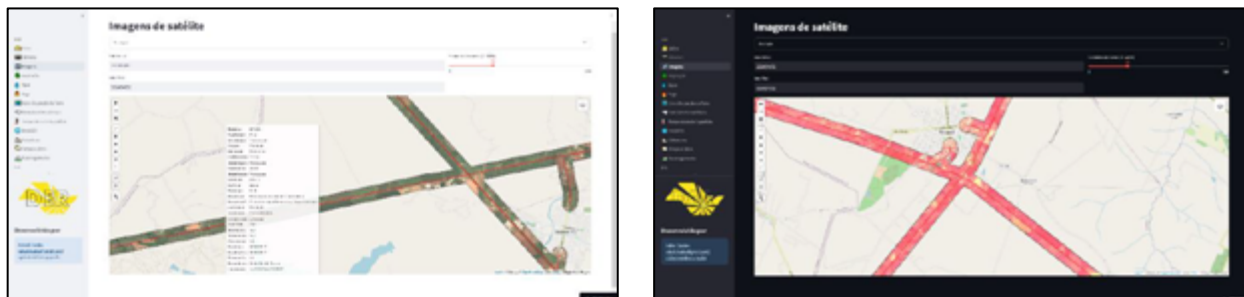


Figura 1. Esq.: Print da funcionalidade de imagens de satélite do sistema de infraestruturas resilientes, cor verdadeira; Dir.: Print da funcionalidade de imagens de satélite do sistema de infraestruturas resilientes, falsa cor. (AUTOR, 2024).

Dados Cadastrais

Como base do sistema e, conseqüentemente, suas análises, foi utilizado o atual Sistema Rodoviário Estadual (SRE) do Estado de São Paulo. O SRE possui uma extensão de aproximadamente 21405,2km em 4736 trechos homogêneos. Seus atributos principais são: quilômetro inicial e final do trecho, sua denominação, extensão, administração, concessão, diretoria regional, tipo de pista, identificação com código.

Área de Análise

Adotou-se uma área de análise para a aplicação da ferramenta de infraestrutura resiliente de 250 metros de *buffer* (ou área de influência). A escolha de área de análise foi adotada para entendimento dos fenômenos que ocorrem na área imediata a rodovia, sua faixa de domínio, sua faixa não-edificante e contexto geográfico de entorno.

MÉTODOS

Todas as análises se utilizam dos princípios do geoprocessamento e sensoriamento remoto, com o uso de ambientes computacionais de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) desktop e processamento de dados em nuvem.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

O NDVI (Rouse et al., 1974) é um índice espectral amplamente utilizado na literatura científica como medidor de atividade fotossintética e biomassa a partir de dados de sensoriamento remoto (Eq. 1). Para esta análise foi utilizado o sensor MSI a bordo do satélite Sentinel-2 A/B com o nível de processamento *Surface Reflectance (Level-2A)*.

É calculado a partir de medidas de reflectância na porção do espectro vermelho e infravermelho próximo (NIR), como demonstrado na equação abaixo. Seu resultado varia entre -1 e 1, onde, quanto mais próximo de -1 ausência ou baixa atividade fotossintética, e quanto mais próximo de 1 maior a atividade fotossintética, vegetação mais abundante e saudável.

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad (1)$$



Rafael Grinberg Chasles, Matheus Amaral Prates, Gean Kenid Sifronio Franco, Vinicius do Prado Capanema, José Luiz Fuzaro Rodrigues, Carolina Iris Brasil Mariano, Bruna Donegá Alves, Daniel Matos & Anderson Barbosa Esteves

Onde, R_{NIR} é a reflectância da radiação NIR e R_{Red} é a reflectância da radiação vermelha visível.

Normalized Difference Water Index (NDWI)

O NDWI (Eq. 2) é utilizado para monitorar mudanças relacionadas ao conteúdo de água em corpos d'água. Como os corpos d'água absorvem fortemente a luz no espectro eletromagnético visível ao infravermelho, o NDWI utiliza bandas verdes e infravermelhas próximas para destacar corpos d'água. Ele é sensível a áreas urbanizadas e pode resultar em uma superestimação dos corpos d'água. O índice foi proposto por McFeeters em 1996.

$$NDWI = \frac{R_G - R_{NIR}}{R_G + R_{NIR}} \quad (2)$$

Onde, R_G é a reflectância da radiação da banda do verde e R_{NIR} é a reflectância da radiação NIR. Seu resultado varia entre -1 e 1, onde valores mais próximos de -1 ausência de água e quanto mais próximo de 1, presença de água. Pode-se adotar o limiar acima de 0,5 para identificação de água. Para esta análise foi utilizado o sensor MSI a bordo do satélite Sentinel-2 A/B com o nível de processamento *Surface Reflectance* (Level-2A).

Fire Information for Resource Management System (FIRMS)

FIRMS distribui dados de incêndios ativos em tempo quase real (NRT, na sigla em inglês) do Espectrorradiômetro de Imagem de Resolução Moderada (MODIS) a bordo dos satélites Aqua e Terra, e do Conjunto de Radiômetros de Imagem Infravermelha Visível (VIIRS) a bordo dos satélites S-NPP, NOAA 20 e NOAA 21 (anteriormente conhecidos como JPSS-1 e JPSS-2). Globalmente, esses dados estão disponíveis dentro de 3 horas da observação pelo satélite. A ferramenta (Fig. 2) possibilita seleção do satélite e intervalo temporal (7h, 24h ou 48h).

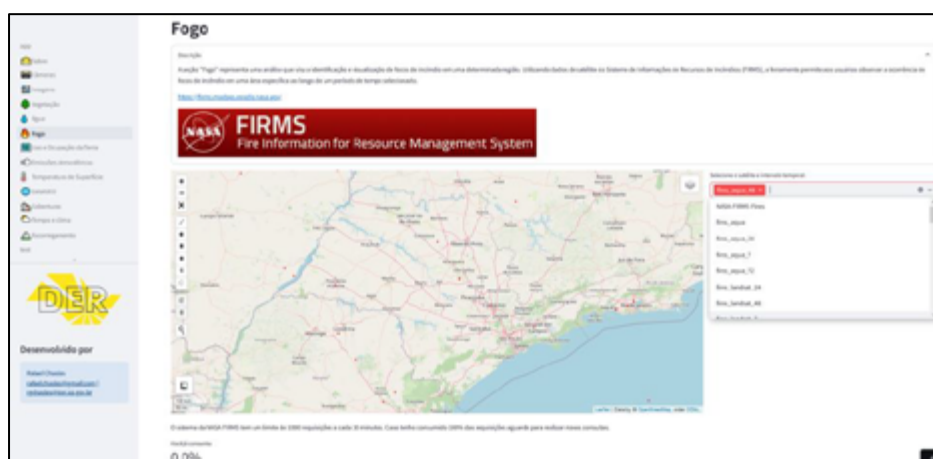


Figura 2. Tela de monitoramento de focos de incêndio (quadrados vermelhos) das últimas 48h de acordo com o sensor Aqua – MODIS. (AUTOR, 2024).

Temperatura de Superfície (Land Surface Temperature – LST)

O LST (ou Temperatura de Superfície) mede a emissão de radiação térmica da superfície terrestre, onde a energia solar incidente interage e aquece o solo, ou a superfície do dossel em áreas vegetadas.



DOI: [10.29327/1430212.49-57](https://doi.org/10.29327/1430212.49-57)

FERRAMENTA DE INFRAESTRUTURAS RESILIENTES:
PLANEJAMENTO E MONITORAMENTO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Essa característica faz do LST um bom indicador da partição de energia na fronteira entre a superfície terrestre e a atmosfera e sensível a mudanças nas condições superficiais (Nemani et al., 1996; Wan et al., 2004; Lambin et al., 1995; Mildrexler et al., 2009). Em escalas espaciais que variam do nível foliar à paisagem, o conhecimento fornecido pelo LST sobre a redistribuição de energia nos fluxos de calor latente e sensível torna-o um dos parâmetros mais importantes nos processos físicos dos balanços de energia e água na superfície (Li et al., 2013; Teskey et al., 2014). Sua recuperação a partir de dados térmicos infravermelhos (TIR) obtidos por sensoriamento remoto fornece medições contínuas de LST com cobertura global para examinar a heterogeneidade térmica da superfície terrestre e o impacto nas temperaturas superficiais resultantes de mudanças naturais e induzidas pelo ser humano (Jin et al., 2010; Li et al., 2015). Para este estudo foi utilizado o satélite MODIS, com 250 metros de resolução espacial e altíssima resolução temporal.

Uso e Ocupação da Terra (*Land Use Land Cover - LULC*)

Foram utilizadas duas bases principais para mapeamento do Uso e Cobertura da Terra. A primeira, o mapeamento de 2020 da ESA com dados dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2 (Fig. 3 Esq.). Este mapeamento utilizou-se de metodologia de aprendizado de máquina para o mapeamento sistemático. Utiliza-se as classes de Vegetação, Vegetação Arbustiva, Pastagem, Agricultura, Área Construída, Solo Exposto e Vegetação Esparsa, Água, Área Úmida, Manguezais e Musgos e Líquens. O segundo *dataset* utilizado foi um mapeamento sistemático em tempo quase real do Google (Fig. 3 Dir.) chamado Dynamic World. Esse mapeamento disponibiliza o LULC assim que uma nova imagem do Sentinel-2 é disponibilizada. Possui as classes: Água, Vegetação, Pastagem Vegetação Inundável, Agricultura, Vegetação rasteira, Área Urbana e Solo Exposto. Ambos os mapeamentos possuem resolução espacial de 10 metros.

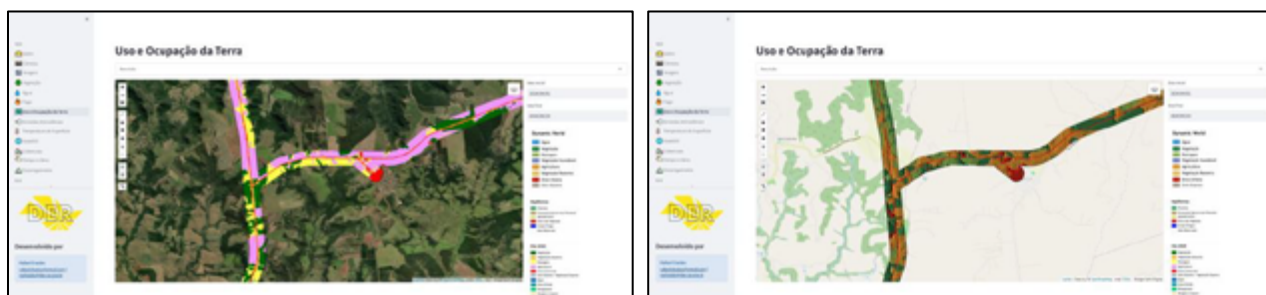


Figura 3. Esq.: Mapa de Uso e Ocupação do Solo de trecho exemplo – ESA, 2020. Dir.: Mapa de Uso e Ocupação do Solo de trecho exemplo – Google, Dynamic World. (AUTOR, 2024).

Emissões Atmosféricas (Metano - CH_4)

Esta análise utilizou dados do satélite Sentinel-5P, sensor TROPOMI, da ESA. Possui resolução espacial de 1113,2 metros e sua concentração é medida pela razão de mistura média de ar seco, expressa em partes por bilhão.

RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados para as análises de NDVI, NDWI, LST e Emissões atmosféricas. Os outros indicadores são tratados de forma diferenciada (apenas visualização ou informações pontuais).



Rafael Grinberg Chasles, Matheus Amaral Prates, Gean Kenid Sifronio Franco, Vinicius do Prado Capanema, José Luiz Fuzaro Rodrigues, Carolina Iris Brasil Mariano, Bruna Donegá Alves, Daniel Matos & Anderson Barbosa Esteves

NDVI

A análise realizada compreende 01 de janeiro de 2023 a 31 de dezembro de 2023, com cobertura máxima de nuvem de 5%, por imagem. Abaixo (Fig. 4) é apresentado mapa de NDVI de trecho exemplo. Quanto mais próximo do verde escuro maior o índice NDVI, quanto mais próximo do laranja, amarelo vermelho e branco, menor o valor de NDVI, ou seja, menor a atividade fotossintética/biomassa.



Figura 4. Mapa de NDVI de trecho exemplo. (AUTOR, 2024).

As rodovias que obtiveram maior valor mediano de NDVI (Fig. 5) foram, respectivamente, SP 125 dos quilômetros 78.95 a 94.5, SPA 055/193 do km 0 ao 13.2 e SP 079 do km 154 ao km 182.5.

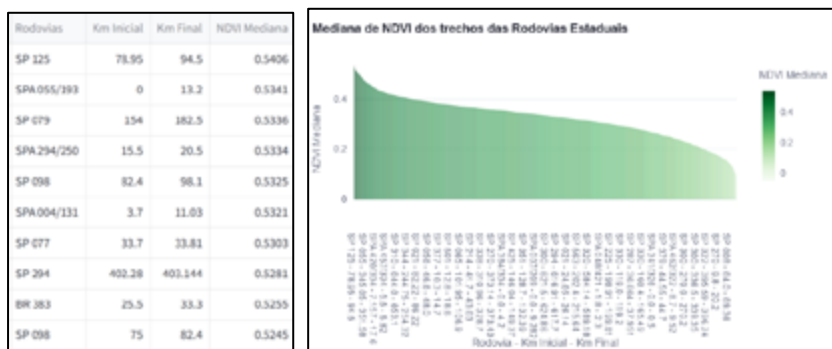


Figura 5. Esq.: Resultados em formato tabular dos dez melhores NDVI dos trechos das rodovias estaduais; Dir.: Gráfico do NDVI de todas os trechos das rodovias estaduais. (AUTOR, 2024).

NDWI

A análise temporal compreendeu o ano de 2023 (de 01 de janeiro de 2023 a 31 de dezembro de 2023). É possível observar que a maior parte das rodovias não possui valores significativos de água (Fig. 6) em seu entorno. O trecho que possui maior valor da mediana NDWI é a SP 326 com valor de 0,1328, seguida da SP 255 com valor de 0,1165.



DOI: 10.29327/1430212.49-57

FERRAMENTA DE INFRAESTRUTURAS RESILIENTES:
PLANEJAMENTO E MONITORAMENTO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

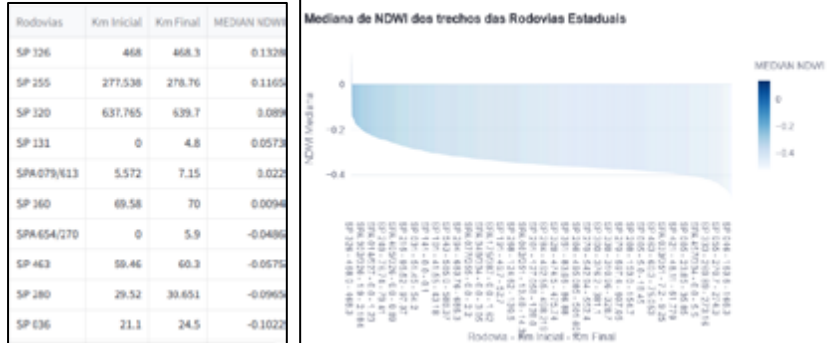


Figura 6. Esq.: Resultados em formato tabular dos dez maiores valores de NDWI dos trechos das rodovias estaduais; Dir.: Gráfico do NDWI de todas os trechos das rodovias estaduais. (AUTOR, 2024).

LST

A análise de temperatura de superfície compreendeu o ano de 2023 (01 de janeiro de 2023 à 31 de dezembro de 2023) com cobertura de nuvens máxima de 5% (Fig. 7). Os resultados apontam que o trecho com maior valor médio de LST, neste ano, foi a SPA 318/330 do km 0 ao km 1,5 com 34,0635°C (graus Celsius) (Fig. 8).

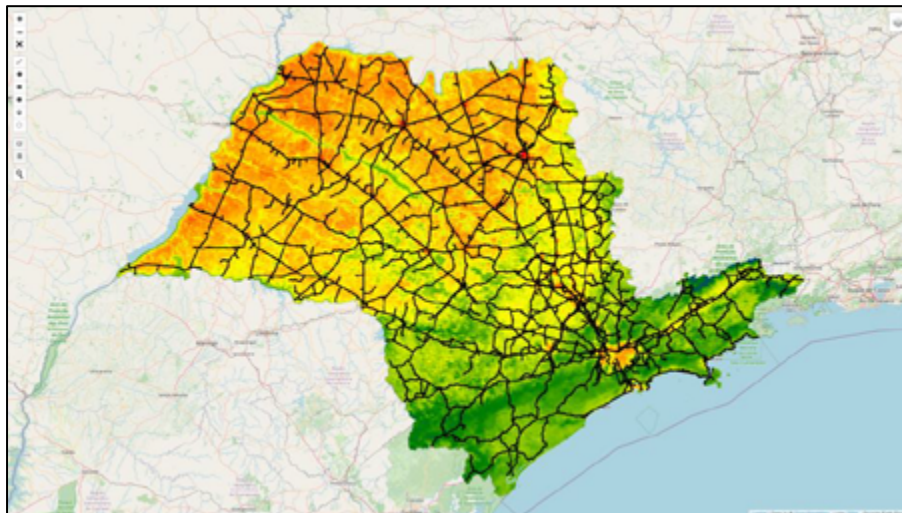
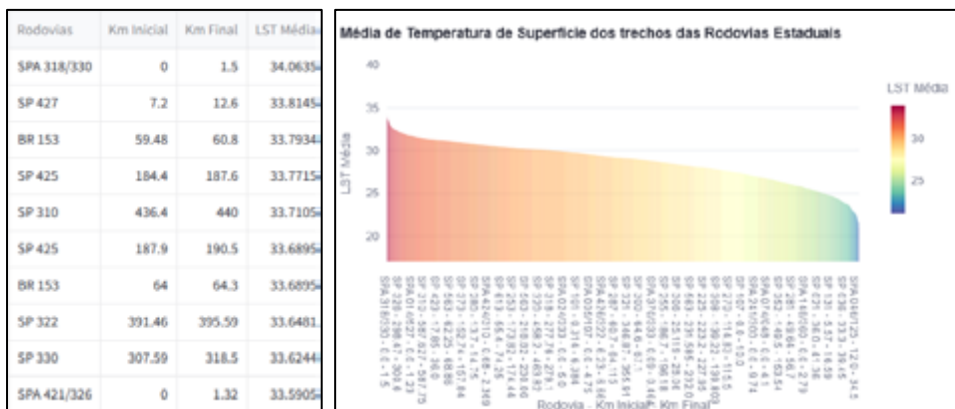


Figura 7. Mapa da média de LST do Estado de São Paulo, no ano de 2023. (AUTOR, 2024).





Rafael Grinberg Chasles, Matheus Amaral Prates, Gean Kenid Sifronio Franco, Vinicius do Prado Capanema, José Luiz Fuzaro Rodrigues, Carolina Iris Brasil Mariano, Bruna Donegá Alves, Daniel Matos & Anderson Barbosa Esteves

Figura 8. Esq.: Resultados em formato tabular dos dez maiores médias LST dos trechos das rodovias estaduais; Dir.: Gráfico do LST de todas os trechos das rodovias estaduais. (AUTOR, 2024).

Emissões Atmosféricas (Metano - CH₄)

A análise de concentração de CH₄ compreendeu o ano de 2023 (01 de janeiro de 2023 a 31 de dezembro de 2023) com cobertura de nuvens máxima de 5% (Fig. 9). Os resultados apontam que o trecho com maior valor mediana de CH₄, neste ano, foi a SPA 175/055 do km 0 ao km 6,3 com 1893,9311 fração mol, seguido do trecho da mesma SPA do km 6,3 ao km 9.335 com concentração de mesmo valor (Fig. 10).

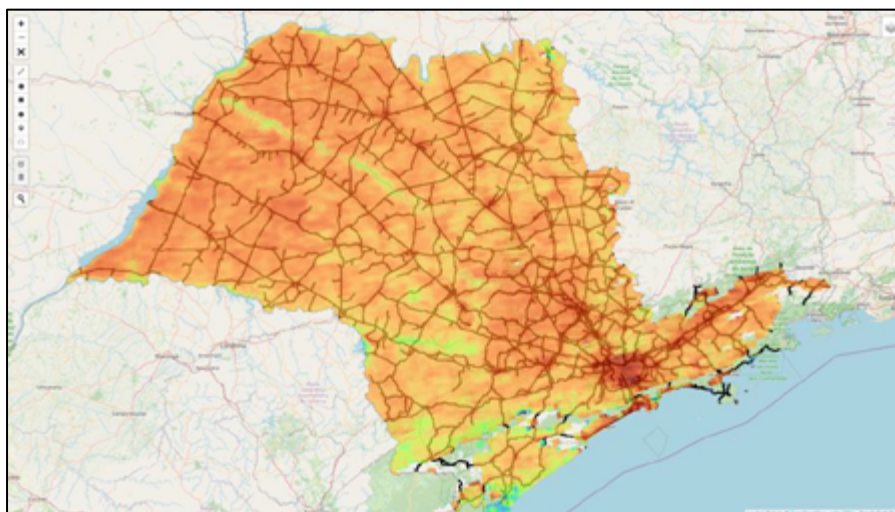


Figura 9. Mapa de concentração de CH₄ do Estado de São Paulo. (AUTOR, 2024).

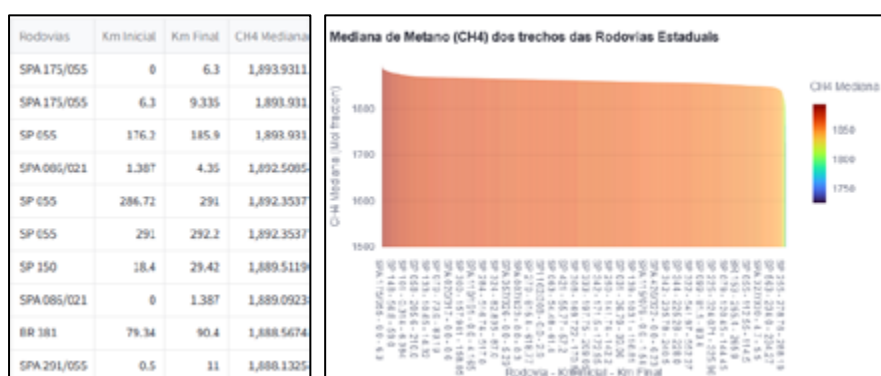


Figura 10. Esq.: Tabela de concentração de CH₄ dos dez trechos com maior concentração das rodovias no Estado de São Paulo. Dir.: Gráfico de concentração de CH₄ de todos os trechos das rodovias no Estado de São Paulo. (AUTOR, 2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ferramenta possibilita uma análise de dados precedentes, monitoramento em tempo quase real e avaliação de cenários futuros de indicadores ambientais que podem contribuir para a transição para uma infraestrutura resiliente. O uso destas análises pode auxiliar tomadores de decisão a atuar e planejar sobre a malha rodoviária direcionado a inteligência de dados (*data-driven intelligence*).



DOI: [10.29327/1430212.49-57](https://doi.org/10.29327/1430212.49-57)

FERRAMENTA DE INFRAESTRUTURAS RESILIENTES:
PLANEJAMENTO E MONITORAMENTO FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Infraestruturas resilientes só serão possíveis quando houver integração entre os diversos setores da sociedade como terceiro setor, iniciativa pública e privada, além dos organismos internacionais. A infraestrutura resiliente ao clima tem o potencial de melhorar a confiabilidade na prestação de serviços, aumentar a vida útil dos ativos e proteger os retornos dos investimentos. Construir resiliência climática pode envolver um conjunto de medidas de gestão (como alterar os cronogramas de manutenção e incluir gestão adaptativa para lidar com a incerteza do futuro) e medidas estruturais (ex.: elevar a altura de pontes para lidar com a elevação do nível do mar, construção de taludes, barreiras contra inundações ou usar infraestrutura natural, como proteger ou aprimorar sistemas naturais de drenagem, proteger manguezais, matas ciliares, florestas úmidas etc.)

Os responsáveis pela tomada de decisões devem ter acesso a dados confiáveis e habilidades para utilizar essas informações na formulação de planos. É essencial comunicar e valorizar as incertezas, além de disponibilizar ferramentas para apoiar a tomada de decisões em ambientes incertos. O uso de plataformas e ferramentas online pode fornecer informações claras, confiáveis e transparentes sobre o comportamento climático presente e futuro. O acesso à informação deve ser acompanhado pelo desenvolvimento de capacidades técnicas e institucionais para gerenciar os riscos climáticos. Estudos indicam que os benefícios de investir em resiliência superam os custos, com altas relações de benefício-custo. Abordagens baseadas na natureza, flexíveis ou inovadoras para infraestrutura resiliente ao clima podem até ser mais baratas do que abordagens tradicionais.

Os próximos passos da construção da ferramenta será a adoção de modelos climáticos e cenários futuros e avaliação de outras áreas de influência como 300 metros, 500 metros e 1 quilômetro. No futuro espera-se poder observar a porcentagem do uso e ocupação da terra por trecho selecionado e filtrado, assim como novos dados de emissões atmosféricas (Monóxido de Carbono – CO, Formaldehide (CH₂O), Dióxido de Nitrogênio - NO₂ e Dióxido Sulfúrico – SO₂), de uso e ocupação da terra (MapBiomass), dados socioeconômicos e de gênero, assim como, novos índices espectrais e análises mais aprofundadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Portaria nº 5, de 31 de janeiro de 2020. Aprova as Diretrizes de Sustentabilidade do Ministério da Infraestrutura. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Edição nº 23, Seção 1, p. 58, 03 de fevereiro de 2020. Disponível: <[https://www.gov.br/transportes/ptr/assuntos/sustentabilidade/diretrizesdesustentabilidade#:~:text=As%20Diretrizes%20de%20Sustentabilidade%20aprovadas,valor%20incorporado%20pelo%20Minist%C3%A9rio%20da](https://www.gov.br/transportes/ptr/assuntos/sustentabilidade/diretrizesdesustentabilidade#:~:text=As%20Diretrizes%20de%20Sustentabilidade%20aprovadas,valor%20incorporado%20pelo%20Minist%C3%A9rio%20da%20Infraestrutura,valor%20incorporado%20pelo%20Minist%C3%A9rio%20da)> Acesso em: 17 abril 2024.

CARVALHO, Celso Santos; MACEDO, Eduardo Soares de; OGURA, Agostinho Tadashi (Orgs.). Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios. Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Brasília, 2007.

GUIMARÃES, David Franklin da Silva; VASCONCELOS, Mônica Alves de; ALEGRIA, Jhonny Martin Manrique; FERREIRA, Fernanda Sousa; SENA, Tony Everton Alves de; PEDROZA DA SILVA, Suzy Cristina; OLIVEIRA, Maria Antônia Falcão de; PEREIRA, Henrique dos Santos. Aplicação de geotecnologias em estudos de desastres naturais na Amazônia: o caso das terras caídas na Costa do Catalão, AM. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Anais... INPE: Santos, 2019.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis (Relatório de Avaliação do Quinto Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - AR5). Genebra,



Rafael Grinberg Chasles, Matheus Amaral Prates, Gean Kenid Sifronio Franco,
Vinicius do Prado Capanema, José Luiz Fuzaro Rodrigues,
Carolina Iris Brasil Mariano, Bruna Donegá Alves,
Daniel Matos & Anderson Barbosa Esteves

2013. Disponível <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf> Acesso em: 17 abril 2024

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

McFeeters, S.K. (1996). The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), p.1425–1432.

Rouse Jr., J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: Freden, S.C., Mercanti, E.P., and Becker, M.A. (Eds.), *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: Vol. I*. Washington, D.C.: NASA, pp. 309–317.

TRAVASSOS, Luciana; TORRES, Paulo Henrique Campello; DI GIULIO, Gabriela; JACOBI, Pedro Roberto; FREITAS, Edmilson Dias de; SIQUEIRA, Isabela Christina; AMBRIZZI, Tércio. (2020) Why do extreme events still kill in the São Paulo Macro Metropolis Region? Chronicle of a death foretold in the global south. *Journal of Urban SustainableDevelopment*, v.1,2020. p.1-16.



RESILIÊNCIA DA INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA: ESTUDO DE CASO DA PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM TALUDES COM AS METODOLOGIAS GUT E AHP FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Bianca Paola Gabardo¹; Celso Luiz dos Santos Romeiro Júnior¹; Luiz Gustavo Blisa de Paula Ferreira¹; Luiz Marcelo de Souza¹

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise abrangente sobre a resiliência das rodovias frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas, com foco na vulnerabilidade dos taludes. Inicialmente, discute-se a importância crescente da resiliência das rodovias diante dos impactos climáticos adversos, especialmente no contexto brasileiro, onde a infraestrutura rodoviária existente enfrenta sérias dificuldades de adaptação. O estudo destaca o impacto das chuvas intensas sobre os taludes, o que resulta na saturação do solo, erosão e deslizamentos de terra cada vez mais frequentes e severos, representando uma ameaça significativa à segurança e à operacionalidade das rodovias. Nesse contexto, as metodologias AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e GUT (Gravidade, Urgência e Tendência) são aplicadas para hierarquizar os terraplenos de maior risco, levando em consideração sua vulnerabilidade às mudanças climáticas. As análises realizadas permitiram uma avaliação criteriosa dos diferentes fatores que contribuem para a vulnerabilidade dos taludes e a relevância de cada critério estudado. Os resultados obtidos revelam convergências e divergências entre as contribuições das duas metodologias, ressaltando suas diferentes abordagens e fundamentos teóricos, entretanto ambas demonstraram eficácia na identificação e priorização dos 12.438 taludes analisados, indicamos os com maior potencial de risco. Essas análises proporcionaram ferramentas para o planejamento estratégico de medidas preventivas e corretivas, que podem ser utilizadas para a melhoria da resiliência das rodovias e para o desenvolvimento de estratégias de adaptação mais eficientes. A aplicação dessa abordagem contribui para a segurança e a sustentabilidade da infraestrutura rodoviária em face aos desafios climáticos emergentes.

PALAVRAS-CHAVE: Rodovias Resilientes; Mudanças Climáticas; Taludes; GUT; AHP.

ABSTRACT

This article presents a comprehensive analysis of the resilience of highways in the face of challenges posed by climate change, with a focus on the vulnerability of slopes. Initially, the growing importance of highway resilience in the face of adverse climate impacts is discussed, especially in the Brazilian context, where existing road infrastructure faces serious adaptation challenges. The study highlights the impact of heavy rains on slopes, resulting in soil saturation, erosion, and increasingly frequent and severe landslides, posing a significant threat to highway safety and operability. In this context, the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Gravidade, Urgência e Tendência (GUT) methodologies are applied to prioritize the most at-risk embankments, considering their vulnerability to climate change. The analyses conducted allowed for a thorough assessment of the different factors contributing to slope vulnerability and the relevance of each studied criterion. The results reveal convergences and divergences between the contributions of the two methodologies, highlighting their different approaches and theoretical foundations; however, both demonstrated effectiveness in identifying and prioritizing the 12,438 analyzed slopes, indicating those with the highest potential risk. These analyses provided tools for strategic planning of preventive and corrective measures, which can be used to improve highway resilience and develop more efficient adaptation strategies. The application of this approach contributes to the safety and sustainability of road infrastructure in the face of emerging climate challenges.

KEY WORDS: Road Resilience; Climate Change; Slopes; GUT; AHP.



¹ Arteris, bianca.gabardo@arteris.com.br; celso.romeiro@arteris.com.br; gustavo.ferreira@arteris.com.br; luizmarcelo.souza@arteris.com.br

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas impactam o mundo de diversas maneiras, desde o aumento das temperaturas globais até alterações nos padrões de precipitação, eventos climáticos extremos e mudanças nos ecossistemas. As consequências destas mudanças afetam diversos setores civis, e exercem um efeito particularmente significativo na infraestrutura de transportes. Conforme evidenciado no estudo "Adaptação às Mudanças Climáticas: Infraestrutura de Transportes" apresentado pelo Centro Clima (2015), as rodovias se destacam como as mais vulneráveis, sujeitas a uma gama mais ampla e grave de riscos em comparação com outras modalidades de transporte. No contexto brasileiro, as rodovias existentes se mostram ainda mais vulneráveis, uma vez que não foram projetadas para antecipar tais mudanças no clima. Eventos extremos de chuva, variações na precipitação, flutuações de temperatura e a elevação do nível do mar estão entre os efeitos que impactam diretamente a rodovia e o formato de manutenção adotado por governos e administradores da rede viária.

Nesse cenário, destaca-se a influência da chuva sobre elementos naturais, como os taludes. De acordo com Kandalai, John e Patel (2023), os problemas nos solos em decorrência das mudanças climáticas são amplos e variados, incluindo questões como aumento na infiltração de água, elevada poro-pressão por conta da saturação do solo, fenômenos de liquefação do solo, falhas, alterações no potencial de absorção, recalques diferenciais e danos à cobertura vegetal, todos os quais podem desencadear consequências como deslizamentos de encostas, inundações e erosão em taludes. O colapso ou a ocorrência de acidentes geológicos nessas estruturas pode afetar o trecho rodoviário de diversas maneiras, desde a desestabilização das camadas de pavimento, a interdição da pista devido à presença de material na faixa de rolamento ou até resultar em acidentes envolvendo os usuários da rodovia.

Diante desse contexto, a resiliência das rodovias surge como um conceito de crescente importância, permitindo uma abordagem essencial para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e garantir a sustentabilidade a longo prazo da infraestrutura rodoviária. Rodovias resilientes são aquelas capazes de resistir e se recuperar de eventos extremos, adaptando-se de forma eficiente às condições ambientais em constante evolução a partir da habilidade de identificar problemas, estabelecer prioridades e, em caso de colapso, mobilizar pessoal e recursos financeiros de forma inteligente (ZHANG; WANG, 2016). Isso implica não apenas em projetar e construir estradas capazes de suportar os impactos das mudanças climáticas, mas também em implementar estratégias de gestão de riscos e manutenção proativas.

Neste estudo, um grupo de concessões de rodovias buscou, através de duas metodologias de priorização (GUT e AHP), analisar e identificar os taludes que representam maiores riscos à infraestrutura rodoviária devido às particularidades físicas e locais de cada terrapleno, em um universo de 12.438 taludes na administração. Corroborando com o conceito de rodovias resilientes, foi considerado nas metodologias a vulnerabilidade de cada característica dos taludes em relação às mudanças climáticas, com o objetivo de aprimorar o planejamento de ações preditivas, a gestão de riscos e a alocação de recursos financeiros de maneira mais eficiente.

DOI: [10.29327/1430212.49-64](https://doi.org/10.29327/1430212.49-64)

RESILIÊNCIA DA INFRAESTRUTURA Rodoviária:

ESTUDO DE CASO DA PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM TALUDES COM AS METODOLOGIAS GUT E AHP FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

METODOLOGIA

Com o intuito de realizar a priorização de taludes que oferecem riscos à rodovia, foram utilizadas as metodologias de priorização GUT e AHP na avaliação e hierarquização das características dos taludes consideradas críticas frente às mudanças climáticas.

GUT

A metodologia GUT, também conhecida como Gravidade, Urgência e Tendência, é uma técnica amplamente utilizada na gestão de projetos e na tomada de decisões. Ela oferece uma estrutura sistemática para avaliar e priorizar problemas, riscos ou oportunidades com base em três critérios principais: a gravidade do impacto, a urgência da ação necessária e a tendência de evolução do problema ao longo do tempo (KEPNER e TREGOE, 1981).

De acordo com Daychouw (2012), no primeiro critério, a gravidade refere-se à magnitude do impacto que o problema pode causar se não for tratado adequadamente. Quanto maior a gravidade, maior a prioridade atribuída ao problema. O segundo critério, urgência, diz respeito à necessidade de uma resposta imediata. Problemas que exigem ação rápida para evitar danos significativos são classificados com alta urgência. Por fim, a tendência avalia a evolução esperada do problema, considerando se está se deteriorando, mantendo-se estável ou melhorando. Essa análise da tendência ajuda a determinar a urgência da intervenção e a melhor estratégia a ser adotada.

Cada fator (G, U, T) recebe uma pontuação de 1 a 5, onde 1 representa a condição menos problemática e 5 representa a mais problemática, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Critérios adotados para atribuição de pontuação para cada variável analisada em relação à gravidade, urgência e tendência do processo (DEWES ET AL, 2021)

Pontuação	Gravidade	Urgência	Tendência
5	Extremamente grave	Precisa de ação imediata	Irá piorar rapidamente
4	Muito grave	Muito urgente	Irá piorar em pouco tempo
3	Grave	Urgente	Irá piorar a médio prazo
2	Pouco grave	Pouco urgente	Irá piorar a longo prazo
1	Sem gravidade	Pode esperar	Não irá piorar

A maior pontuação de cada critério é elencada, e o produto entre os três fatores são então priorizados, conforme descrito por BERSSANETI e BOUER (2013).

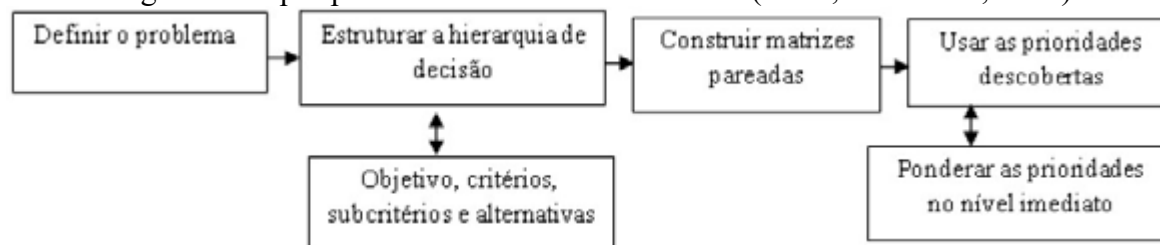
AHP

A Análise Hierárquica de Processos (AHP, do inglês *Analytic Hierarchy Process*) é uma técnica de tomada de decisão multicritério amplamente utilizada para lidar com escolhas complexas. Desenvolvida por Thomas Saaty na década de 1970, a AHP fornece uma estrutura matemática para a decomposição de problemas em hierarquias de critérios e alternativas, facilitando a análise e a comparação entre diferentes opções.



Bianca Paola Gabardo,
Celso Luiz dos Santos Romeiro Júnior,
Luiz Gustavo Blisa de Paula Ferreira,
Luiz Marcelo de Souza

Figura 1. Etapas para tomada de decisão no AHP (REIS; TERAZZI, 2020)



Na metodologia AHP, Saaty (1994) determina que os decisores são solicitados a decompor o problema em uma estrutura hierárquica de objetivos, critérios e alternativas. Em seguida, eles atribuem pesos relativos aos critérios e realizam comparações pareadas para avaliar a importância relativa de cada critério em relação aos outros. Essas comparações são transformadas em uma matriz de prioridades que reflete as preferências individuais ou coletivas dos tomadores de decisão. O ponto fundamental da metodologia é traduzir em pesos o julgamento de relevância de cada critério analisado (MOGOLLÓN, 2000).

Tabela 2. Escala fundamental dos números absolutos de Saaty (Adaptado de SAATY, 2008)

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Importância Igual	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância Moderada	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente uma atividade em detrimento de outra.
5	Forte Importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre outra
7	Muito forte ou importância demonstrada	Uma atividade é favorecida muito fortemente em detrimento de outra.
9	Extrema Importância	A evidência que favorece uma atividade em detrimento de outra é da mais alta ordem possível de afirmação.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Utilizados como valores de consenso entre as opiniões.

Após a realização da matriz de julgamentos, é realizada a avaliação de consistência para analisar se os julgamentos da matriz de decisão são consistentes ou não. Para tal, o índice de consistência (IC) calculado deve ser menor que 0,1 (AVILA, 2023).

A principal vantagem da AHP é a capacidade de lidar com problemas complexos de forma estruturada e racional, incorporando tanto aspectos quantitativos quanto qualitativos. Ao fornecer uma estrutura analítica clara e um método consistente para avaliar e ponderar múltiplos critérios, a AHP ajuda os decisores a chegar a conclusões mais fundamentadas e a tomar decisões mais informadas em uma ampla gama de contextos, desde o planejamento estratégico até a seleção de fornecedores e a alocação de recursos.

Neste trabalho, a metodologia AHP foi utilizada para avaliar os mesmos aspectos utilizados na metodologia GUT. Ao contrário da metodologia GUT, onde são dados níveis de 1 a 5 para cada



DOI: 10.29327/1430212.49-64

RESILIÊNCIA DA INFRAESTRUTURA Rodoviária:

ESTUDO DE CASO DA PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM TALUDES COM AS METODOLOGIAS GUT E AHP FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

montante de gravidade, urgência e tendência, na metodologia AHP os aspectos dos taludes são confrontados entre si, e dado à cada um uma porcentagem de priorização.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de direcionamento nos conceitos de rodovias resilientes, foram analisadas, na metodologia GUT e AHP, dez características dos taludes: altura, inclinação, distância do acostamento, condição da drenagem, nota de monitoramento, pluviosidade média e máxima mensal, histórico de sinistro, VDM (volume diário médio de tráfego) na rodovia e número de faixas de rolamento por sentido da via. Tais características foram escolhidas pois impactam no comportamento do talude em situações extremas de chuvas, no risco que um possível sinistro poderia causar aos usuários, colaboradores e ativos da rodovia, e na dificuldade de operacionalização da rodovia em uma situação extrema (DER, 1991; DNIT, 2006; VALENTE, 2023).

GUT

Na metodologia GUT, para cada característica considerada na Tabela 3, foram designados 5 intervalos de criticidade de acordo com a experiência e histórico das concessionárias para a correspondência com a metodologia de Saaty.

Tabela 3. Características dos taludes por tipo de critério adotado (AUTORES, 2024)

GRAVIDADE	URGÊNCIA	TENDÊNCIA
Altura	Distância do Acostamento	Nota de Monitoramento
Inclinação	Nº de Faixas por Sentido	Ocorrência de Sinistro
Condição da Drenagem	VDM	-
Pluv. Média Mensal	-	-
Pluv. Máxima Mensal	-	-

A Tabela 4 representa um exemplo de intervalos de criticidades, neste caso de tendência de acordo com a Nota de Monitoramento, com os parâmetros GUT referentes. Os monitoramentos aqui citados se referem aos monitoramentos anuais de taludes exigidos em contrato, baseados no Manual de Taludes de Rodovias do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP). No monitoramento, são determinadas notas de gravidade da situação de cada talude que podem ir de 0 a 3, sendo 3 o pior caso.

Tabela 4. Parâmetros da Matriz GUT para a criticidade de Tendência em Nota de Monitoramento (AUTORES, 2024)

Nota de Monitoramento	Parâmetros da Matriz GUT
Nota 0 atual	1
Recorrência de nota 1	2
Aumento de nota nos últimos anos	3
Recorrência de nota 2 (ou 3 no passado)	4



Bianca Paola Gabardo,
Celso Luiz dos Santos Romeiro Júnior,
Luiz Gustavo Blisa de Paula Ferreira,
Luiz Marcelo de Souza

Nota 3 atual, independente da recorrência	5
---	---

Em seguida, para cada talude foi atribuída o parâmetro de 1 a 5 designado nos intervalos do passo anterior, em todas as 10 características analisadas. Com as correlações numéricas feitas, elencou-se o maior parâmetro de gravidade (verificando o maior parâmetro entre altura, inclinação, condição da drenagem, pluviosidade média e máxima mensal), o maior parâmetro de urgência (verificando os parâmetros de distância do acostamento, número de faixas de rolamento por sentido e VDM) e tendência (analisando o parâmetro da nota de monitoramento e do histórico de ocorrência de sinistro). Ao final, tem-se para cada talude um valor de G, U e T, que multiplicados, resultam no valor GUT daquele terrapleno.

Como o parâmetro mínimo é 1 e o máximo é 5, a relação de taludes poderá ter valores GUT entre 1 e 125, sendo 125 a priorização mais importante. Este último cenário, na prática, indicaria um talude com risco de ocorrência de sinistros de alta gravidade e que afetariam a rodovia e sua operacionalização caso ocorressem.

AHP

Na segunda metodologia testada, AHP, o processo foi adequado para que a comparação com o GUT fizesse sentido. Os critérios principais da matriz foram: Gravidade, Urgência e Tendência, e os subcritérios da matriz foram as mesmas características parametrizadas na metodologia GUT, conforme a Tabela 5.

Tabela 5. Critérios e subcritérios da matriz AHP (AUTORES, 2024)

Critérios	Gravidade	Urgência	Tendência
Subcritérios	Altura	Distância do Acostamento	Tendência de Nota
Subcritérios	Inclinação	Número de Faixas por Sentido	Ocorrência de Sinistro
Subcritérios	Condição da Drenagem	VDM	-
Subcritérios	Pluviosidade Média Mensal	-	-
Subcritérios	Pluviosidade Máxima Mensal	-	-

O segundo passo foi o de construir a matriz de julgamento dos critérios de seleção. Nessa etapa, ao invés de dar pesos e importâncias diferentes para cada critério, optou-se por manter a proporção nos 3 critérios, já que na metodologia GUT não há distinção de importância entre gravidade, urgência e tendência. Desta forma, cada critério teve peso 33,33%, conforme indicado nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Matriz de julgamento dos critérios (AUTORES, 2024)

Critérios	Gravidade	Urgência	Tendência
Gravidade	1,0	1,0	1,0
Urgência	1,0	1,0	1,0
Tendência	1,0	1,0	1,0
Σ	3,0	3,0	3,0



DOI: 10.29327/1430212.49-64

RESILIÊNCIA DA INFRAESTRUTURA Rodoviária:

ESTUDO DE CASO DA PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM TALUDES COM AS METODOLOGIAS GUT E AHP FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Tabela 7. Normalização e vetor prioridade da matriz de julgamento dos critérios (AUTORES, 2024)

Crítérios	Gravidade	Urgência	Tendência	Prioridade
Gravidade	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%
Urgência	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%
Tendência	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%

Em seguida, as mesmas matrizes de julgamento e normalização foram montadas para avaliar os subcritérios. Cada matriz de julgamento dos subcritérios foi realizada em conjunto com quatro profissionais envolvidos diretamente na gestão da manutenção de taludes do grupo, que discutiram os pesos e relevâncias entre os subcritérios baseados no histórico de atuação e de condução de sinistros em taludes, e definiram os resultados das matrizes. As Tabelas de 8 a 13 apresentam a matriz de julgamento, a normalização e vetor prioridade dos subcritérios de acordo com cada critério apresentado.

Tabela 8. Matriz de julgamento dos subcritérios de gravidade (AUTORES, 2024)

Subcritérios	Altura	Inclinação	Condição da Drenagem	Pluv. Média Mensal	Pluv. Máxima Mensal
Altura	1	3	5	7	3/1
Inclinação	1/3	1	3	5	5/1
Condição da Drenagem	5/1	3/1	1	3	7/1
Pluv. Média Mensal	7/1	5/1	3/1	1	9/1
Pluv. Máxima Mensal	3	5	7	9	1

Tabela 9. Normalização e vetor prioridade da matriz dos subcritérios de gravidade (AUTORES, 2024)

Subcritérios	Altura	Inclinação	Condição da Drenagem	Pluv. Média Mensal	Pluv. Máxima Mensal	Prioridade
Altura	21,4%	31,5%	30,6%	28,0%	18,7%	26,0%
Inclinação	7,1%	10,5%	18,4%	20,0%	11,2%	13,4%
Condição da Drenagem	4,3%	3,5%	6,1%	12,0%	8,0%	6,8%
Pluv. Média Mensal	3,1%	2,1%	2,0%	4,0%	6,2%	3,5%
Pluv. Máxima Mensal	64,2%	52,4%	42,9%	36,0%	56,0%	50,3%

IC: 0,05



Bianca Paola Gabardo,
Celso Luiz dos Santos Romeiro Júnior,
Luiz Gustavo Blisa de Paula Ferreira,
Luiz Marcelo de Souza

Tabela 10. Matriz de julgamento dos subcritérios de urgência (AUTORES, 2024)

Crítérios	Distância do Acostamento	Número de faixas por sentido	VDM
Distância do Acostamento	1	5	5
Número de faixas por sentido	1/5	1	1
VDM	1/5	1	1

Tabela 11. Normalização e vetor prioridade da matriz dos subcritérios de urgência (AUTORES, 2024)

Crítérios	Distância do Acostamento	Número de faixas por sentido	VDM	Prioridade
Distância do Acostamento	71,4%	71,4%	71,4%	71,4%
Número de faixas por sentido	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%
VDM	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%

IC: 0,00

Tabela 12. Matriz de julgamento dos subcritérios de tendência (AUTORES, 2024)

Crítérios	Tendência de Nota	Ocorrência Instabilização
Tendência de Nota	1,0	0,5
Ocorrência Instabilização	2,0	1,0

Tabela 13. Normalização e vetor prioridade da matriz dos subcritérios de tendência (AUTORES, 2024)

Crítérios	Tendência de Nota	Ocorrência Instabilização	Prioridade
Tendência de Nota	33,3%	33,3%	33,3%
Ocorrência Instabilização	66,7%	66,7%	66,7%

IC: 0,00

A Tabela 14 mostra o ranking dos indicadores de priorização de taludes após a consolidação das matrizes finais.



DOI: 10.29327/1430212.49-64

RESILIÊNCIA DA INFRAESTRUTURA Rodoviária:

ESTUDO DE CASO DA PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM TALUDES COM AS METODOLOGIAS GUT E AHP FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Tabela 14. Ranking dos indicadores de priorização de taludes (AUTORES, 2024)

Subcritérios	Critérios	Gravidade	Urgência	Tendência	Prioridade Total	Ranking
		33%	33%	33%		
Distância do Acostamento			71,4%		23,8%	1
Ocorrência Instabilização				66,7%	22,2%	2
Pluv. Máxima Mensal		50,3%			16,8%	3
Tendência de Nota				33,3%	11,1%	4
Altura		26,0%			8,7%	5
Número de faixas por sentido			14,3%		4,8%	6
VDM			14,3%		4,8%	6
Inclinação		13,4%			4,5%	7
Condição da Drenagem		6,8%			2,3%	8
Pluv. Média Mensal		3,5%			1,2%	9

As características dos taludes que tiveram maior prioridade foram a distância do acostamento, pluviosidade máxima mensal e histórico de ocorrência de sinistro. A distância do acostamento ficou em primeiro lugar por determinar se um sinistro, por mais grave que seja, irá ou não afetar a rodovia e oferecer perigo aos usuários. Destaca-se que a análise deste estudo é realizada em uma malha rodoviária concedida com padrão de tráfego médio a alto, onde qualquer evento que interfira no acostamento ou faixa de rolamento tem impacto significativo na operação e segurança da rodovia. Tal impacto pode ser de diferente magnitude em rodovias de baixo tráfego. O histórico de ocorrência de sinistro no local é importante pois indica o quão vulnerável o talude é ao local e às características físicas e climáticas, e sinaliza taludes com tendência a sinistrarem novamente ou de agravar o que já ocorreu anteriormente. A pluviosidade máxima mensal engloba os picos de chuva máxima no local, representando neste estudo as ocorrências de chuvas extremas devido às mudanças climáticas.

Em seguida, para aplicação das prioridades nas informações de taludes, foram normalizadas as variáveis contínuas, para que a grandeza de valores não interferisse na priorização. As variáveis categóricas foram adaptadas de forma coerente com as classificações realizadas no GUT.

DISCUSSÕES

Como a metodologia GUT determina intervalos de criticidade para cada nota de 1 a 5, os resultados obtidos são delimitados de forma mais categorizada, visto que a menor criticidade sempre será 1, e a maior, 125. Já na metodologia AHP, são definidos pesos que somados dão 100%. Esses pesos são multiplicados pela normalização da característica avaliada e, visto a diversidade de taludes, características físicas e locais possíveis no cenário do grupo, as combinações são muito diversas e não se tem um conjunto de taludes com a maior criticidade, por exemplo. Esta foi uma dificuldade encontrada ao comparar as duas metodologias.

Para fins de análise, foi selecionada a mesma quantidade de taludes considerados mais críticos nas duas metodologias, a partir da quantidade de taludes com o valor GUT de 125. Comparando os taludes indicados como prioritários, houve convergência nas priorizações em 50% dos taludes. Entretanto observou-se que os taludes divergentes, apesar de não serem os mais



prioritários, não tinham criticidade baixa. Considerando os taludes prioritários da AHP como base, os GUTs eram em sua maioria 100 e 125 (26 taludes com alto AHP tiveram GUT de 80 a 40).

Ao comparar os resultados obtidos através das metodologias GUT e AHP para a priorização de problemas ou riscos, é importante considerar que enquanto a GUT se baseia em critérios mais amplos e simplificados - gravidade, urgência e tendência - a AHP permite uma decomposição hierárquica mais detalhada, incorporando múltiplos critérios e subcritérios. Ainda, a forma como os critérios são ponderados também difere entre os dois métodos: na AHP, os pesos são atribuídos através de comparações pareadas, enquanto na GUT não há uma técnica explícita para essa atribuição. Isso pode levar a variações na importância relativa dos critérios e, consequentemente, nos resultados. Além disso, a GUT, tem um ponto mais subjetivo na definição das divisões dos parâmetros, já que não é realizada a normalização dos dados. Já a AHP tem mais subjetividade na denominação dos pesos definidos entre os subcritérios.

CONCLUSÃO

Neste estudo, são analisados os fatores relevantes para a resiliência de taludes como parte dos ativos rodoviários diante das mudanças climáticas. Através das metodologias GUT e AHP, investiga-se a relevância destes fatores na ocorrência de sinistros com o objetivo de priorizar estruturas mais e menos críticas.

Os resultados da comparação entre as metodologias GUT e AHP para a priorização de problemas ou riscos apresentaram diferenças em suas abordagens, e consequentemente, nos resultados. Enquanto a GUT oferece uma categorização mais clara dos resultados, com intervalos definidos de criticidade, a AHP permite uma análise mais detalhada, com a atribuição de pesos e a consideração de múltiplos critérios e subcritérios. Apesar das divergências, as metodologias apresentaram priorizações semelhantes, o que possibilita a análise e aplicação dos resultados na gestão destes ativos. Entende-se que ambos os formatos de priorização devam ser calibrados conforme a obtenção de novos estudos e informações que possam ajudar de forma objetiva na decisão de priorização.

A integração de conceitos de vulnerabilidade climática e resiliência de rodovias nas metodologias de priorização oferece às concessionárias ferramentas importantes para o planejamento de ações preditivas, a alocação inteligente de recursos financeiros e uma gestão mais eficaz dos riscos associados aos taludes. Essa abordagem não apenas fortalece a capacidade da infraestrutura rodoviária de resistir e se recuperar de eventos climáticos extremos, mas também contribui para a segurança dos usuários das rodovias e para a sustentabilidade a longo prazo do sistema viário em face dos desafios climáticos emergentes.



DOI: [10.29327/1430212.49-64](https://doi.org/10.29327/1430212.49-64)

RESILIÊNCIA DA INFRAESTRUTURA Rodoviária:

ESTUDO DE CASO DA PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM TALUDES COM AS METODOLOGIAS GUT E AHP FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVILA, A. R. S. Um Estudo Sobre os Conceitos Matemáticos que Sustentam o Método de Análise Hierárquica (AHP). 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Matemática Aplicada) - Instituto de Matemática, Estatística e Física, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2023.

BERSSANETI, F. T.; BOUER, G. Qualidade: conceitos e aplicações - Em produtos, projetos e processos. São Paulo: Blucher, 2013.

CENTRO CLIMA; LIMA; COPPE – Adaptação às Mudanças do Clima: Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, Secretaria de Assuntos Estratégicos. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento: Projeto BRA/06/0322015, 2015.

DAYCHOUW, M. 40 Ferramentas e Técnicas de Gerenciamento. 4a ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2012.

DEWES, J. J.; SOUSA, R. S.; MAFFRA, C. R. B.; SUTILI, F. J.; PINHEIRO, R. J. B. Método GUT para hierarquização de erosões ao longo de margens de reservatórios de usinas hidrelétricas. Revista Scientia Vitae, Vol. 8, número 32, 2021. Disponível em: <https://www.revistaifpsr.com/v11n325769>. Acesso em 03 de maio de 2024.

DER-SP. DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. Manual de geotecnia: taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991. 388 p. Disponível em: <http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Documentos/Geotecnia.aspx>. Acesso em: 25 de maio de 2024.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual para Atividades Ambientais Rodoviárias. IPR, Publ, Rio de Janeiro, n. 730, 2006.

KANDALAI, S.; JOHN, N. J.; PATEL, A. Efeitos das Mudanças Climáticas em Infraestruturas Geotécnicas — estado da arte. Environ Sci Pollut Res, 2023. DOI: 10.1007/s11356-022-24788-7.

KEPNER, C. H.; TREGOE, B. B. O administrador racional. São Paulo: Atlas, 1981.

LOPES, M. A. REIS, E. M. B.; DEMEU, F. A.; MESQUITA, A. G. F. R.; PELEGRINI, D. F.; FARIA, J. G. K.; TEIXEIRA JUNIOR, F. E. P. Uso de ferramentas de gestão na atividade leiteira: um estudo multicaseos em Uberlândia, MG. Revista Agropecuária Técnica, v. 39, n. 1, p. 73–86, 2018.

MOGOLLÓN, R. M. A. El AHP y su Aplicación para Determinar los Usos de las Terras – El Caso de Brasil. Proyecto Regional “Información sobre Tierras y Águas para um desarrollo agrícola sostenible” (Proyecto GCP/RLA/126/JPN), Informe Técnico nº 2, FAO, Santiago, Chile, p. 65, 2000.

REIS, A. L.; TERAZZI, L. F. Priorização Através Do Método Analytic Hierarchy Process (AHP) de Indicadores Logísticos de Transporte em uma Empresa Distribuidora de Produtos Congelados. XI FATECLOG: Os Desafios Da Logística Real no Universo Virtual. Bragança Paulista/SP, 2020.

SAATY, T.L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. Int. J. Services Sciences, v. 1, n. 1, p. 83 – 98, 2008. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.

SAATY, T.L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process, 1994. DOI: 10.13128/Aestim-7138.

VALENTE, L. V. M. Proposta para classificação de risco de taludes rodoviários. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2023.

ZHANG, W.; WANG, N. Resilience-based risk mitigation for road networks, Structural Safety, Volume 62, 2016, Pages 57-65, ISSN 0167-4730. Acesso em: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2016.06.003>.



CONSIDERAÇÕES SOBRE OS POSSÍVEIS IMPACTOS DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE CASO DA MALHA DA CCR VIASUL

William Fedrigo¹; Rodrigo de Sousa Rabelo¹; Bárbara Ribeiro Costa¹; Jhonnathan Preisner de Souza¹ & Luis Miguel Gutierrez Klinsky¹

RESUMO

As mudanças climáticas representam um enorme risco para a vida humana, a natureza e as estruturas construídas, como os pavimentos rodoviários. Desde o segundo semestre de 2023, o Rio Grande do Sul tem enfrentado eventos climáticos extremos, incluindo ciclones extratropicais e volumes elevados de precipitação, provocando danos significativos de cunho humano ou financeiro. Este artigo visa analisar os possíveis impactos de eventos climáticos extremos em pavimentos rodoviários, utilizando informações oriundas da literatura e dados da malha rodoviária administrada pela concessionária CCR ViaSul como estudo de caso. No estudo, utilizou-se os dados da malha rodoviária (precipitação, defeitos de pavimento e produtividade das equipes de manutenção/restauração), juntamente com registros de danos causados pelos eventos ocorridos no RS durante o segundo semestre de 2023 e o primeiro de 2024, além de observações oriundas de artigos científicos sobre o assunto. Os resultados indicam que os níveis de precipitação foram bastante superiores às médias históricas, resultando em danos visíveis nos pavimentos, especialmente após os eventos de 2024. Isso também ocasionou acréscimo no número de defeitos e redução na produtividade das equipes. A literatura também aponta consistentemente para o risco de impactos substanciais aos pavimentos devido às mudanças climáticas, mesmo quando os danos não são imediatamente evidentes. Portanto, é crucial que se passe a considerar os efeitos de eventos climáticos extremos ao projetar pavimentos e avaliar os riscos associados a esses eventos, dada a tendência à recorrência. Caso contrário, espera-se uma necessidade mais frequente de manutenção/restauração, resultando em custos mais elevados para a infraestrutura rodoviária.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento rodoviário; Mudança climática; Evento climático extremo; Precipitação; Ciclone extratropical.

ABSTRACT

Climate change poses a huge risk to human life, nature, and built structures such as road pavements. Since 2023, Rio Grande do Sul has been experiencing extreme weather events, including extratropical cyclones and high precipitation volumes, causing significant human or financial damages. This article aims at analyzing the potential impacts of extreme weather events on road pavements, using information from the literature and data from the road network managed by the concessionaire CCR ViaSul as a case study. The study used data from the road network (precipitation, pavement defects, and productivity of maintenance/rehabilitation teams), along with records of damages caused by events occurred in 2023 and 2024, as well as observations from scientific articles on the subject. The results indicate that precipitation levels were higher than historical averages, resulting in visible damages to pavements, especially after the events of 2024. This also led to an increase in the number of pavement defects and a reduction in team productivity. The literature consistently points to the risk of substantial impacts on pavements due to climate change, even when damages are not immediately evident. Therefore, it is crucial to consider the effects of extreme weather events when designing pavements and assessing the risks associated with these events, given their tendency to recur. Otherwise, a more frequent need for maintenance/rehabilitation is expected, resulting in higher costs for the road infrastructure.

KEY WORDS: Road pavement; Climate change; Extreme weather event; Precipitation; Extratropical cyclone.

¹ Grupo CCR, william.fedrigo@grupoccr.com.br; rodrigo.rabelo@grupoccr.com.br; barbara.costa@grupoccr.com.br; jhonnathan.souza@grupoccr.com.br; luis.klinsky@grupoccr.com.br



DOI: [10.29327/1430212.49-67](https://doi.org/10.29327/1430212.49-67)

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS POSSÍVEIS IMPACTOS DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS:
ESTUDO DE CASO DA MALHA DA CCR VIASUL

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um enorme risco para a vida humana, a natureza e as estruturas construídas. Entre essas estruturas, a malha rodoviária desempenha um papel crucial, garantindo o deslocamento eficiente, seguro e confiável de pessoas, mercadorias e serviços. Essa rede está constantemente exposta às intempéries naturais, tornando-a particularmente suscetível aos impactos das mudanças climáticas.

A integridade estrutural e funcional do pavimento rodoviário é significativamente afetada pelas condições ambientais, embora muitas vezes esses aspectos não sejam considerados nos projetos. As condições climáticas, combinadas com as cargas de tráfego, os materiais de pavimentação utilizados e o regime de manutenção, podem resultar em deterioração e falha do pavimento se não forem adequadamente controladas.

Desde o segundo semestre de 2023, o Estado do Rio Grande do Sul tem enfrentado eventos climáticos extremos, incluindo ciclones extratropicais e volumes elevados de precipitação. Esses eventos provocam, entre outras consequências, inundações e alagamentos, que por sua vez geram danos significativos, sejam eles de cunho humano e financeiro.

Como mencionado, a infraestrutura rodoviária, incluindo o pavimento, é severamente afetada por eventos dessa natureza. Portanto, este artigo visa analisar os possíveis impactos de eventos climáticos extremos nos pavimentos rodoviários, utilizando informações oriundas da literatura e dados respectivos à malha rodoviária administrada pela concessionária CCR ViaSul (rodovias BR-101, BR-290, BR-386 e BR-448) como estudo de caso.

EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS OCORRIDOS NO RS EM 2023

Nesta etapa da pesquisa, foram analisados dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), de forma a evidenciar a natureza extrema dos eventos climáticos registrados no RS.

O segundo semestre de 2023 foi excepcionalmente adverso para o Rio Grande do Sul (RS) no que tange a eventos climáticos. A ocorrência de eventos como ciclones extratropicais ocasionando alto volume de chuvas, cheias, alagamentos e ventos de alta velocidade foi amplamente divulgada pela mídia. Especificamente nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro, diversos episódios desta natureza foram registrados no estado, levando a prejuízos significativos.

Do ponto de vista das chuvas, o volume de precipitação superou a média em diversas regiões, e em alguns casos, como em Porto Alegre, atingiu marcas históricas. Durante o mês de setembro, foram registrados 447,3 mm, o que corresponde a aproximadamente 300 mm a mais do que a normal climatológica e duas vezes a média histórica (1991-2020) para a região, tendo sido o maior volume registrado em um único mês desde 1916, quando iniciaram-se os registros meteorológicos.

Entre os meses de junho e outubro, o estado enfrentou a incidência de 9 ciclones tropicais, caracterizados por ventos intensos e precipitações pluviométricas volumosas (G1, 2023). Conforme Figura 1, o volume médio de chuvas ao longo do período compreendido entre junho e novembro de 2023 excedeu em 130% a média registrada nos meses de janeiro a maio do mesmo ano.

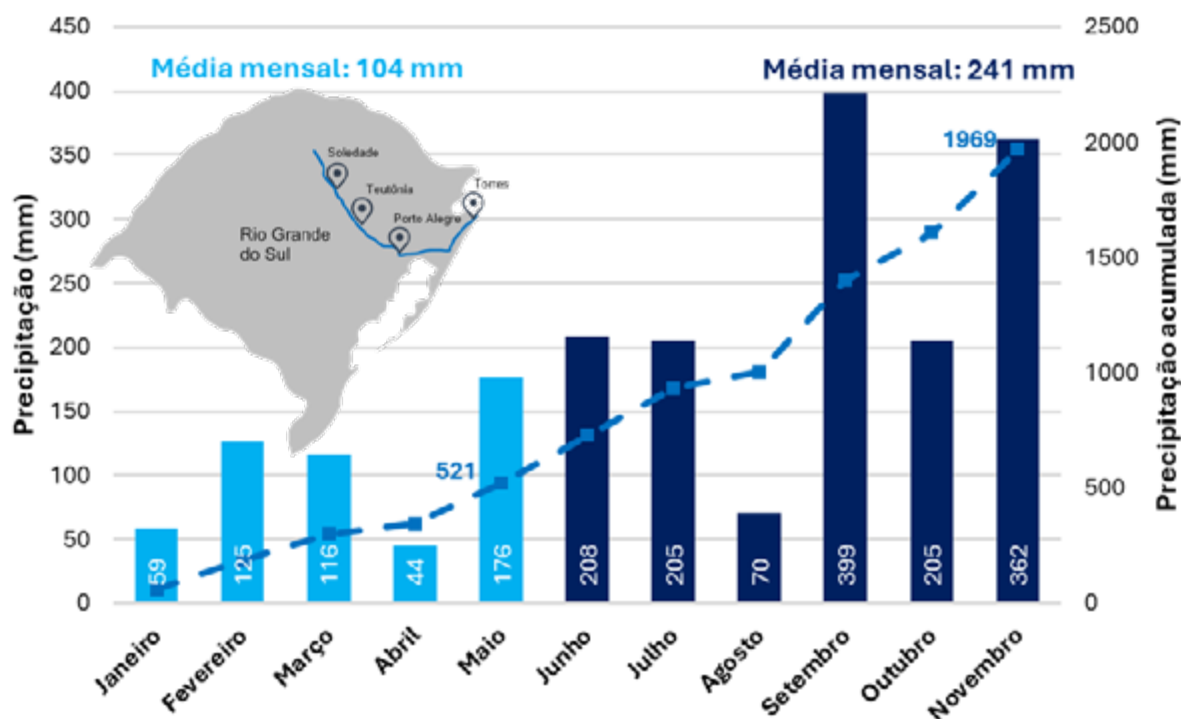


Figura 1. Precipitação registrada na malha da CCR ViaSul em 2023 (Dados: INMET)

Conforme mencionado, particularmente, o mês de setembro destacou-se de maneira preocupante em Porto Alegre, com registros históricos indicando ser este o mês mais chuvoso em um período de 107 anos. Os dados apresentados são do INMET, para as estações ao longo da malha administrada pela CCR ViaSul (Porto Alegre, Soledade, Torres e Teutônia, estação mais próxima à Lajeado).

Tal anormalidade nos índices pluviométricos resultou em inundações generalizadas. Doze cidades foram submetidas a interrupções no fornecimento de energia, afetando aproximadamente 100 mil habitantes (BAND, 2023). Conforme a Defesa Civil, cerca de 360 mil pessoas foram impactadas pelos eventos, enfrentando deslocamentos, danos em residências e a necessidade de assistência humanitária, além de terem sido registrados 49 óbitos diretamente atribuíveis aos fenômenos (G1, 2023). Os prejuízos econômicos foram igualmente expressivos, com estimativas da Confederação Nacional de Municípios apontando para perdas da ordem de 1,3 bilhão de reais (VEJA, 2023).

No mês de dezembro de 2023, observou-se a manutenção do cenário acima narrado, registrando-se novamente valores acumulados de precipitação em volume significativamente maiores do que a média histórica (INMET, 2023a). Os eventos extremos ocorridos no mês foram, inclusive, objeto de nota técnica do INMET (INMET, 2024a), apresentando como causa de tais eventos a combinação de frentes frias, baixas pressões, em conjunto com os efeitos do El Niño.

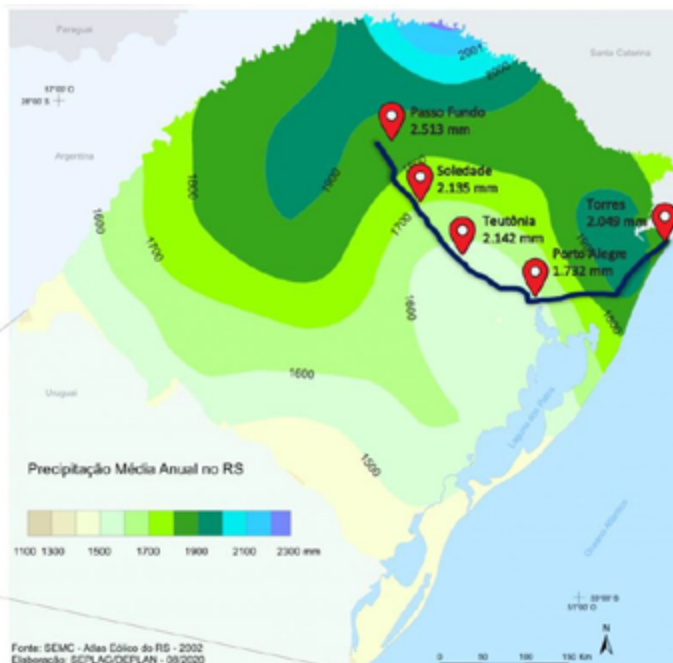
Em 2023, a precipitação registrada nas cidades localizadas ao longo da malha administrada pela CCR ViaSul que possuem estações pluviométricas do INMET foi bastante superior (em média, 30%) à média histórica anual até 2022 (dados da SEPLAG/DEPLAN) no estado, conforme Figura 2. Por exemplo, na cidade de Teutônia, localizada na região de Lajeado, cidade pela qual passa a rodovia BR-386, a precipitação registrada foi 45% acima da média histórica para a região. Em Passo Fundo, próxima à Carazinho (km 180 da BR-386), esse número chega a 40%.



DOI: 10.29327/1430212.49-67

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS POSSÍVEIS IMPACTOS DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS:
ESTUDO DE CASO DA MALHA DA CCR VIASUL

Precipitação média anual registrada em 2023 nas cidades ao longo da malha da ViaSul



Fonte: INMET :: Tempo

*Fonte: Núcleo de Informações Hidrometeorológicas - Histórico de Dados (univates.br)

Fonte: SEMC - Atlas Cólido do RS - 2002
Elaboração: SERLAG/OEPLAN - 09/2020

Figura 2. Precipitação média em 2023 em cidades localizadas na malha da CCR ViaSul (Dados: INMET)

Os dados apresentados na Figura 3 corroboram as informações previamente descritas, ou seja, após o final de 2023, observa-se que o segundo semestre se mostrou muito mais chuvoso do que o primeiro. Nesse período choveu, em média, no estado, o correspondente a 74% da precipitação do ano, confirmando a natureza extrema dos eventos. Em todas as cidades analisadas (aquelas que possuem estações pluviométricas do INMET), observa-se que tal percentual excedeu 60%.

Precipitação registrada no segundo semestre de 2023 em comparação com o ano inteiro

No segundo semestre de 2023, choveu o correspondente a 74% da precipitação registrada para o ano inteiro

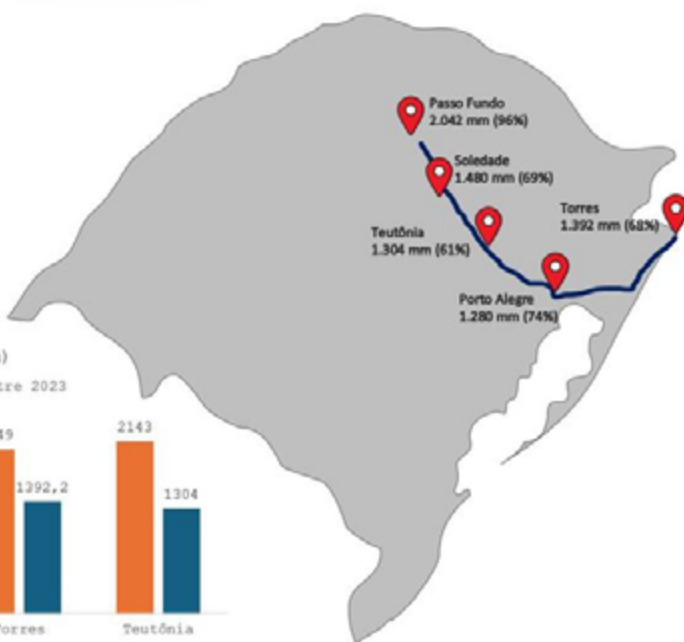


Figura 3. Precipitação no segundo semestre de 2023 em cidades localizadas na malha da CCR ViaSul (Dados: INMET)



De forma complementar, os dados do INPE também demonstram que a precipitação excessiva registrada em 2023 foi uma anomalia climática. Conforme as Figuras 4, 5 e 6, percebe-se que, independentemente da região (124, 120 e 119), o nível de chuvas em 2023 foi superior à média histórica utilizada pelo órgão (1981-2010) e aos valores registrados entre 2020 e 2022.

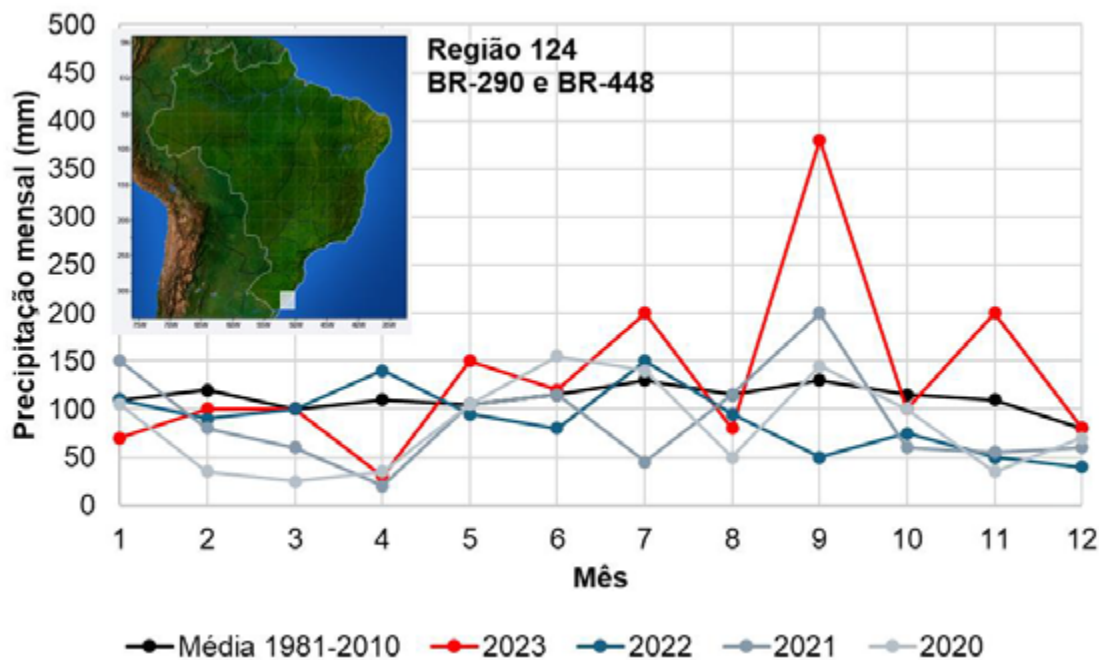


Figura 4. Precipitação mensal para a região 124 (BR-290 e BR-448) de 2020 a 2023 (Dados: INPE)

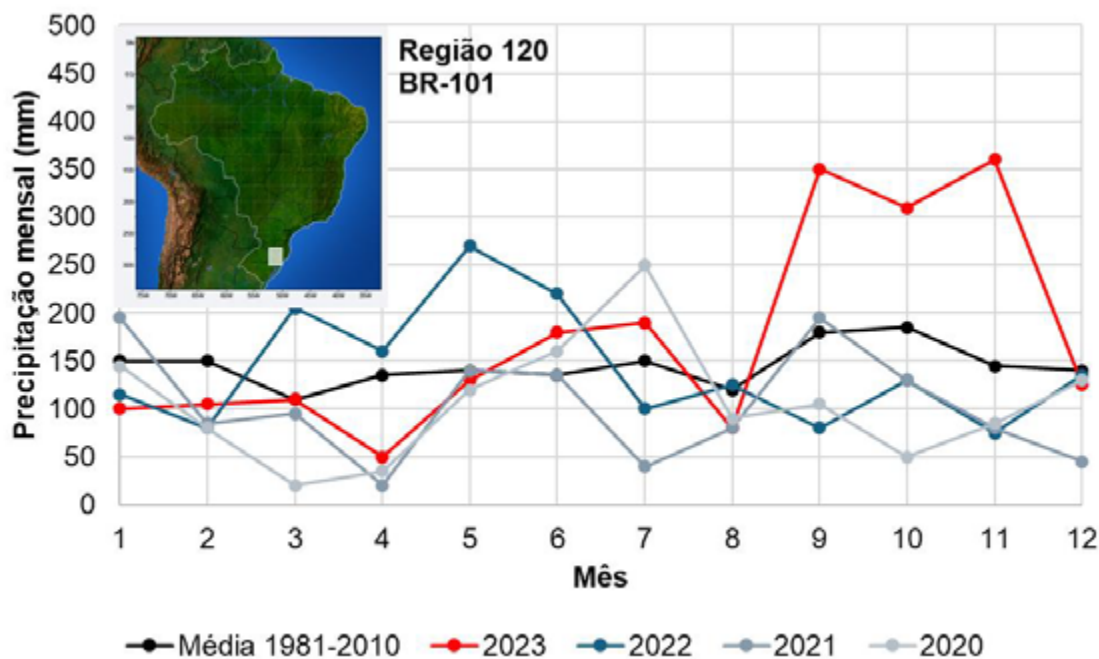


Figura 5. Precipitação mensal para a região 120 (BR-101) de 2020 a 2023 (Dados: INPE)



DOI: 10.29327/1430212.49-67

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS POSSÍVEIS IMPACTOS DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS:
ESTUDO DE CASO DA MALHA DA CCR VIASUL

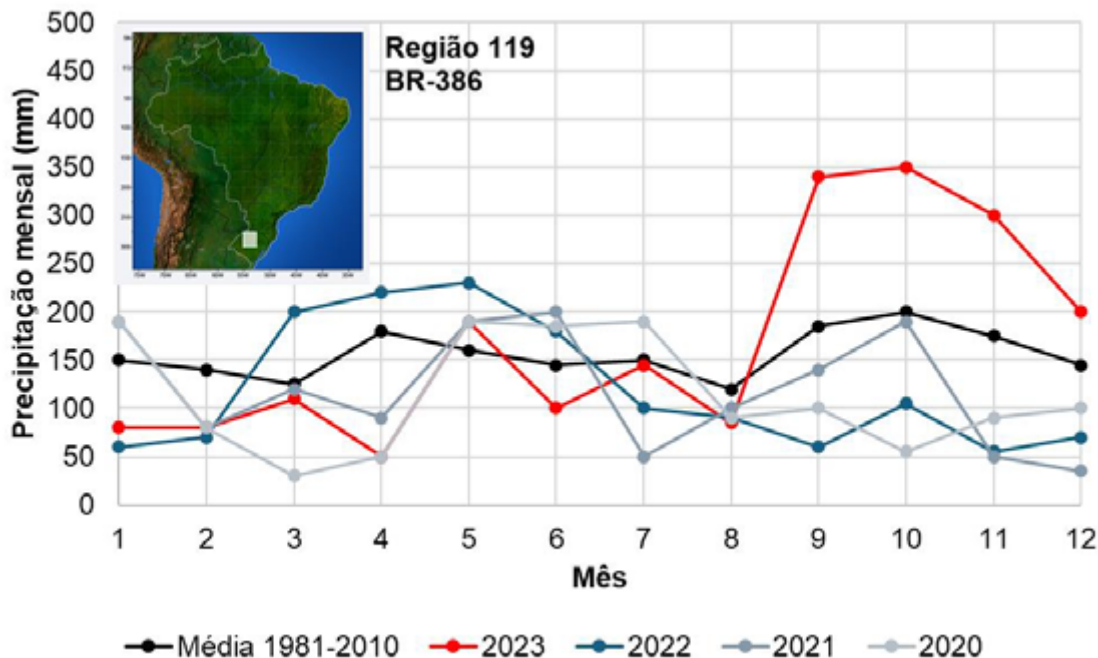


Figura 6. Precipitação mensal para a região 119 (BR-386) de 2020 a 2023 (Dados: INPE)

Analisando-se o período de setembro a novembro (Figura 7), trimestre de maior precipitação, verifica-se níveis superiores aos anos anteriores e acréscimo de 92% com relação à média histórica.

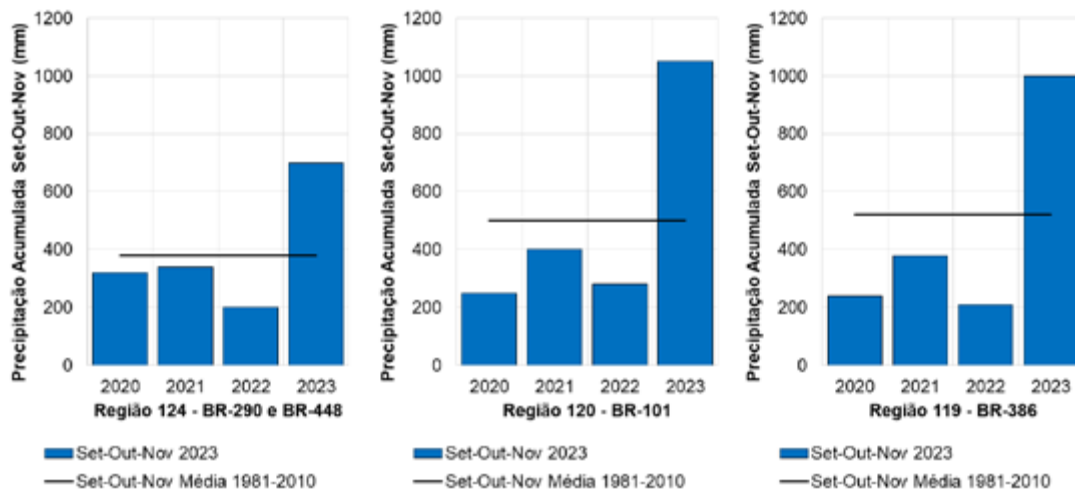


Figura 7. Precipitação do trimestre setembro a novembro para as regiões 124, 120 e 119 de 2020 a 2023 (Dados: INPE)

IMPACTOS DOS EVENTOS CLIMÁTICOS DE 2023 NO PAVIMENTO

Nesta etapa, buscou-se analisar o que a literatura relata sobre o impacto de eventos climáticos no desempenho de pavimentos. Além disso, foram analisados dados que serviriam como indicadores dos impactos diretos dos eventos climáticos observados no RS no pavimento das rodovias da malha



administrada pela CCR ViaSul (defeitos não permissíveis no contrato de concessão e produtividade das equipes de manutenção/restauração).

Os eventos naturais extremos que ocorreram no Rio Grande do Sul entre junho e novembro de 2023 tiveram consequências significativas nos pavimentos das rodovias da malha administrada pela CCR ViaSul, demandando a implementação de estratégias apropriadas para a manutenção e a restauração das vias.

É de conhecimento dos engenheiros de pavimentação que a água (chuvas) tem impacto na degradação do pavimento asfáltico, acelerando tal processo. A água infiltrada promove a desagregação do concreto asfáltico, resultando em trincas e panelas evidentes na superfície da rodovia. O acúmulo de água propicia o surgimento de patologias superficiais, como desprendimento de materiais e deterioração precoce da superfície do pavimento.

A comunidade científica corrobora com essa perspectiva, embora ainda seja escasso o número de artigos sobre o assunto. Pesquisa publicada na revista *Nature* relata que as mudanças climáticas podem ter impactos generalizados nas rodovias, principalmente nos pavimentos. Esses impactos acontecem devido a precipitações intensas, temperatura extremas (calor/frio) e outros desafios não físicos que degradam a qualidade e a longevidade da infraestrutura (UNDERWOOD *et al.*, 2017).

Outras duas pesquisas anteriores também apontam que mudanças nos níveis de precipitação têm um impacto significativo na vida útil do pavimento (HEITZMAN *et al.*, 2011; MNDawe *et al.*, 2015). Da mesma forma, furacões, ciclones e outros eventos climáticos extremos também impactam negativamente o desempenho de pavimentos. É relatado na literatura que pavimentos que tiveram sua estrutura submersa durante o Furacão Katrina tornaram-se mais frágeis do que aqueles que não foram submersos (GASPARD *et al.*, 2007).

Em estudo realizado na *North Carolina State University*, verificou-se que danos na estrutura de pavimentos causados por enchentes são prováveis. Os resultados mostram que o pavimento pode parecer funcional por resistir a um evento extremo ou devido à reabilitação da superfície após tais eventos, mas abaixo das camadas superficiais, o pavimento pode continuar a se deteriorar após o evento, levando a problemas de longo prazo e redução da vida útil do pavimento. As simulações de desempenho de pavimento realizadas sugerem que o aumento do afundamento causado por enchentes pode chegar a 16% no caso de uma estrutura com subleito arenoso e 19% no caso de subleito argiloso. Além disso, o estudo demonstra que o trincamento por fadiga também é exacerbado pela ação das chuvas (MATINI *et al.*, 2022).

A Figura 8 mostra o efeito de inundações na serventia (condição do pavimento em relação a conforto, rolamento e segurança) e na vida útil de pavimentos. Percebe-se uma queda brusca de serventia imediatamente após o evento de inundação e uma diminuição de dois anos na vida útil da estrutura do pavimento. Os autores do estudo relatam que a ação do tráfego durante ou imediatamente após a água das enchentes baixar resulta em uma deterioração precoce e significativa do pavimento, além de exigir manutenção e restauração mais custosas (MATINI; QIAO; SIAS, 2022).



DOI: 10.29327/1430212.49-67

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS POSSÍVEIS IMPACTOS DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS:
ESTUDO DE CASO DA MALHA DA CCR VIASUL

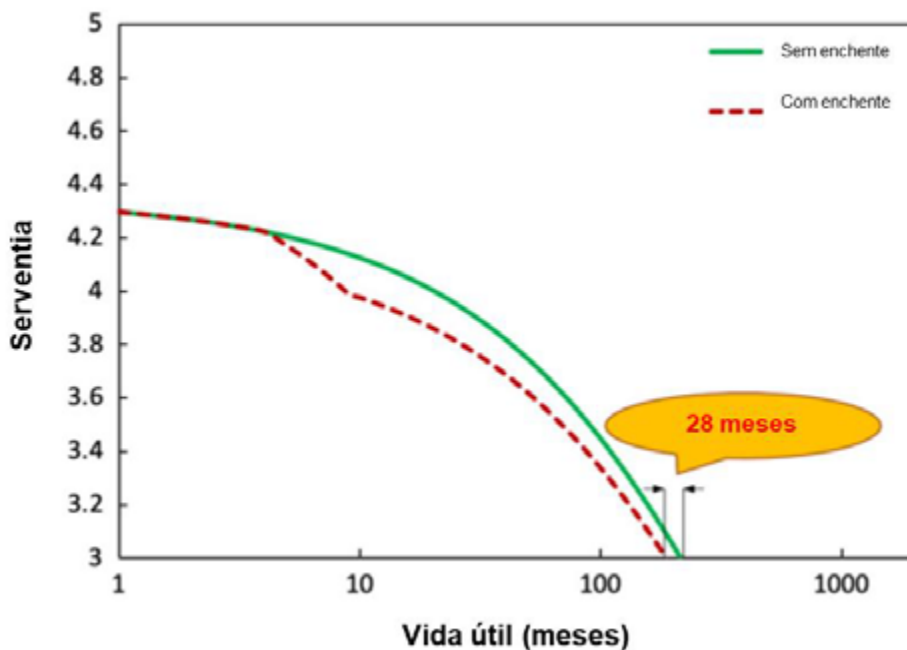


Figura 8. Efeito de inundações no desempenho de pavimentos (MATINI; QIAO; SIAS, 2022)

A Figura 9 mostra que o número de notificações de defeitos não permissíveis de pavimento acompanhou os índices pluviométricos em 2023. Durante o período crítico (junho a novembro), foi registrado um aumento de 180% nas notificações em comparação com o intervalo de janeiro a maio. Além disso, comparando-se esse período (junho a novembro) com o mesmo período de 2022, ocorreu um aumento de 180% na precipitação e de 75% no número de notificações de defeitos.

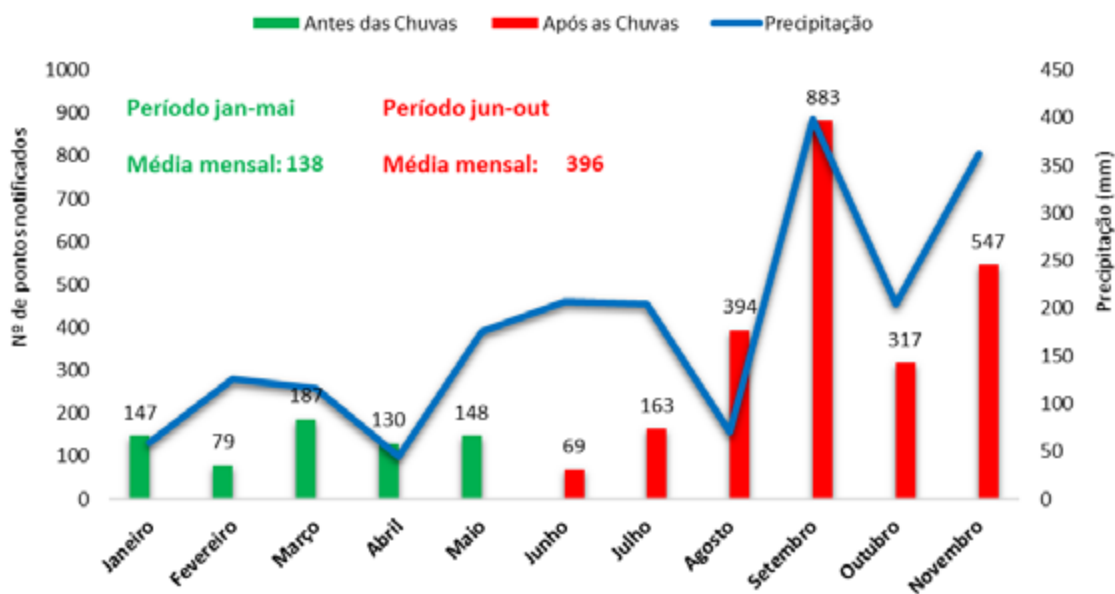


Figura 9. Notificações de defeitos não permissíveis e precipitação em 2023



A produtividade das equipes de manutenção/restauração de pavimento também foi prejudicada (Figura 10). As equipes registraram 58 dias de trabalho de junho a novembro, enquanto, de janeiro a maio, foram registrados 93 dias de trabalho por equipe. Isso representa uma queda de 30% na produtividade das equipes durante os eventos climáticos. Ainda, no período de junho a novembro de 2023, apenas em 43 dias não foi observada precipitação nas estações pluviométricas ao longo da malha administrada pela CCR ViaSul, contrastando com o mesmo período do ano anterior, no qual foram observados 68 dias não chuvosos.

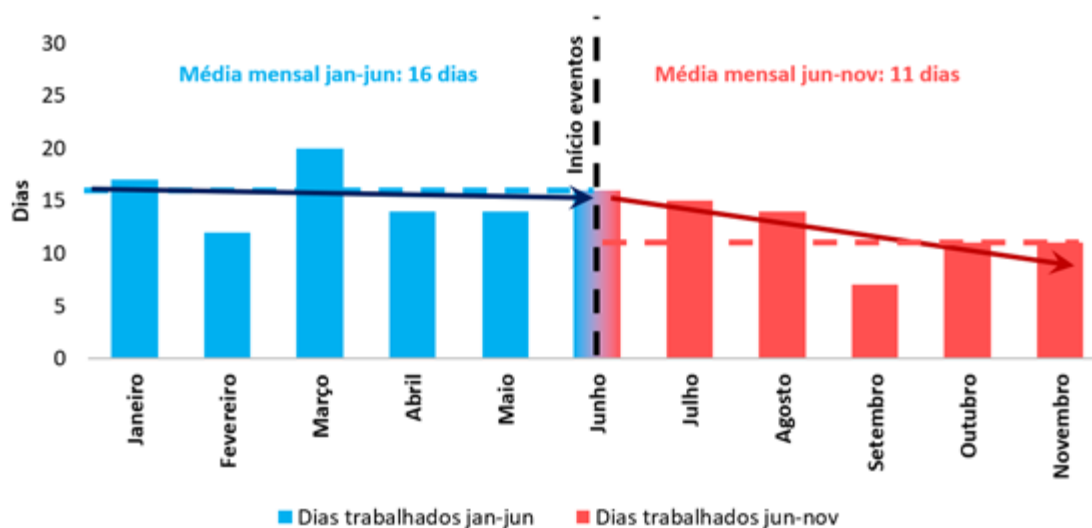


Figura 10. Produtividade das equipes de pavimentação em 2023

EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS DE 2024

Nesta seção, faz-se um relato dos novos eventos climáticos extremos registrados no RS entre abril e maio de 2024, sendo necessário destacar que fenômenos como os ocorridos no ano de 2023 não parecem ter sido fatos isolados e aparentemente se tornarão cada mais frequentes.

Os eventos de 2024 foram ainda mais devastadores que os registrados em 2023. No dia 30 de abril de 2024, o governo do Rio Grande do Sul decretou estado de calamidade pública (situação reconhecida também pelo Governo Federal) após as fortes chuvas que atingiram diferentes cidades e ocasionaram 75 óbitos (CNN, 2024), até o momento, já superando os eventos de 2023.

O Instituto Nacional de Meteorologia emitiu mais três alertas de temporais para o Rio Grande do Sul (INMET, 2024b), com diferentes graus de perigo, a depender das regiões abrangidas. A metade norte do Estado foi a área de maior preocupação. Os eventos foram considerados de grande intensidade, sendo classificados como desastres de Nível III (BRASIL, 2024), resultando em chuvas intensas, alagamentos, granizo, inundações, enxurradas e vendavais em várias regiões do estado. Confirmando as piores projeções, a cheia do lago Guaíba superou a inundação histórica de 1941, até então, a maior do estado, quando as águas chegaram a 5,27 metros e alagaram o Centro Histórico e outros bairros da cidade de Porto Alegre (METSUL, 2024).

Ainda é incerto o tempo necessário para que se determine os danos totais causados pelos eventos climáticos de abril/maio de 2024, visto que os efeitos deles continuam a ocorrer. Quanto ao pavimento da malha administrada pela CCR ViaSul, enquanto em 2023, os impactos dos eventos climáticos eram de certa forma subjetiva, estando em linha com o reportado por Matini *et al.*



DOI: [10.29327/1430212.49-67](https://doi.org/10.29327/1430212.49-67)

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS POSSÍVEIS IMPACTOS DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS:
ESTUDO DE CASO DA MALHA DA CCR VIASUL

(2022), aqueles de 2024 podem ser observados visualmente em diversos locais, conforme demonstrado nas Figuras 11, 12 e 13.



Figura 11. Ruptura de talude no km 276 da rodovia BR-386



Figura 12. Danos severos no pavimento da rodovia BR-386



Figura 13. Danos severos no pavimento da rodovia BR-290

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, foram realizadas considerações sobre os impactos de eventos climáticos extremos em pavimentos rodoviários. Para tal, utilizou-se os dados do ano de 2023 da malha rodoviária administrada pela concessionária CCR ViaSul (precipitação, notificações de defeitos não permissíveis e produtividade das equipes de manutenção/restauração), juntamente com registros de danos causados pelos eventos ocorridos no Rio Grande do Sul durante o segundo semestre de 2023 e o primeiro de 2024, além de observações oriundas de artigos científicos sobre o assunto.

Os resultados do estudo destacam que os níveis de precipitação registrados no RS excederam significativamente as médias históricas. Com o acréscimo da precipitação (em magnitude e duração), ocorreu também um acréscimo no número de notificações de defeitos não permissíveis, bem como a redução da produtividade das equipes de manutenção/restauração de pavimento. Além disso, os danos físicos aos pavimentos se tornaram visíveis, especialmente após os eventos de 2024. É importante destacar que, mesmo quando os danos não são imediatamente evidentes, a literatura aponta consistentemente para o risco de impactos substanciais na infraestrutura do pavimento devido às mudanças climáticas. O pavimento pode parecer funcional à primeira vista, mas abaixo da superfície pode continuar a se deteriorar no período pós-evento, resultando em problemas de longo prazo e redução da vida útil.



DOI: [10.29327/1430212.49-67](https://doi.org/10.29327/1430212.49-67)

**CONSIDERAÇÕES SOBRE OS POSSÍVEIS IMPACTOS DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS:
ESTUDO DE CASO DA MALHA DA CCR VIASUL**

Portanto, torna-se cada vez mais crucial considerar elevadas precipitações e outros eventos extremos ao analisar e projetar pavimentos. Além disso, os riscos associados a esses eventos devem ser avaliados com maior frequência e magnitude, dada a aparente tendência à recorrência. Caso contrário, é esperada uma necessidade de manutenção/restauração mais frequente, resultando em custos mais elevados para a infraestrutura rodoviária.

REFERÊNCIAS

Chuvas no RS: número de vítimas fatais sobe para 75; veja onde ocorreram as mortes | CNN Brasil. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/chuvas-no-rs-numero-de-vitimas-fatais-sobe-para-75-veja-onde-ocorreram-as-mortes/>. Acesso em: 4 maio. 2024.

Ciclone no RS: 12 cidades sofrem com a falta de energia | Vídeos Band. Disponível em: <https://www.band.uol.com.br/videos/ciclone-no-rs-12-cidades-sofrem-com-a-falta-de-energia-17179850>. Acesso em: 4 maio. 2024.

Ciclone no RS: mais uma morte é confirmada pelo governo e total de vítimas chega a 49 | Rio Grande do Sul | G1. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2023/09/19/ciclone-no-rs-mais-uma-morte-e-confirmada-e-total-chega-a-49.ghtml>. Acesso em: 4 maio. 2024.

Contraste térmico e El Niño: especialistas explicam sequência de 9 ciclones no RS em 3 meses | Rio Grande do Sul | G1. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2023/09/28/contraste-termico-e-el-nino-especialistas-explicam-sequencia-de-9-ciclones-no-rs-em-3-meses.ghtml>. Acesso em: 4 maio. 2024.

INMET. **Eventos extremos de dezembro de 2023 no Brasil.** Serviço de Pesquisa Aplicada. 2024.

Eventos extremos: dezembro/2023 foi marcado por diversos episódios de chuva com impactos no agronegócio | INMET. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/eventos-extremos-dezembro-2023-foi-marcado-por-bastante-calor-e-diversos-epis%C3%B3dios-de-chuva-com-impactos-no-agroneg%C3%B3cio>. Acesso em: 4 maio. 2024.

GASPARD, K. *et al.* Impact of Hurricane Katrina on Roadways in the New Orleans Area. 2007.

Governador decreta estado de calamidade pública por conta das cheias no RS - Portal do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/governador-decreta-estado-de-calamidade-publica-por-conta-das-cheias-no-rs>. Acesso em: 4 maio. 2024.

HEITZMAN, M. *et al.* **Developing MEPDG Climate Data Input Files for Mississippi.** Final Report FHWA/MS-DOT-RD-11-232. 2011.

INMET :: Alert-AS. Disponível em: <https://alertas2.inmet.gov.br/47288>. Acesso em: 4 maio. 2024.

MATINI, N. *et al.* Evaluation of Structural Performance of Pavements under Extreme Events: Flooding and Heatwave Case Studies. <https://doi.org/10.1177/03611981221077984>, v. 2676, n. 7, p. 233–248, 9 mar. 2022.

MATINI, N.; QIAO, Y.; SIAS, J. E. Development of Time–Depth–Damage Functions for Flooded Flexible Pavements. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, v. 148, n. 2, p. 04022011, 22 fev. 2022.

MNDAWE, M. B. *et al.* Assessment of the effects of climate change on the performance of pavement subgrade. **African Journal of Science, Technology, Innovation and Development**, v. 7, n. 2, p. 111–115, 2015.

Porto Alegre, uma zona de guerra |METSUL. Disponível em: <https://metsul.com/porto-alegre-uma-zona-de-guerra/>. Acesso em: 4 maio. 2024.

UNDERWOOD, B. S. *et al.* Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise. **Nature Climate Change** 2017 7:10, v. 7, n. 10, p. 704–707, 18 set. 2017.



ANÁLISE DOS EFEITOS DO CLIMA, DO TRÁFEGO E DO TIPO DE MISTURA NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Clara Rayssa Romero Rodrigues Souza¹; Bruno Cavalcante Mota²; Marcos Lamha Rocha³; Francisco Thiago Sacramento Aragão⁴ & Luis Alberto Herrmann do Nascimento⁵

RESUMO

Considerando a grande utilização de recursos naturais no setor de transportes, a necessidade de desenvolver tecnologias sustentáveis tem se tornado cada vez mais urgente. Alguns fatores devem ser levados em consideração na escolha dessas tecnologias, incluindo o clima, a estrutura, o tráfego, entre outros pontos que vão influenciar a durabilidade e o conforto proporcionado pelo pavimento. Este trabalho avalia o desempenho mecânico, no que diz respeito à deformação permanente, de cinco tipos de misturas asfálticas: convencional quente, morna, morna com o uso de material fresado, com e sem agente rejuvenescedor, e quente com material fresado e agente rejuvenescedor. O programa FlexPave 1.1 foi utilizado para simular o desempenho mecânico dessas misturas em uma estrutura de pavimento flexível e para diferentes condições climáticas e de tráfego. Os resultados obtidos demonstraram a influência das condições climáticas na durabilidade e no desempenho dos pavimentos asfálticos, de acordo com o tipo de mistura adotada. Os resultados também evidenciaram a importância da consideração de aspectos ambientais em conjunto com a seleção adequada de materiais e o método de produção de misturas asfálticas para a geração de pavimentos resistentes e duradouros.

PALAVRAS-CHAVE: Mistura Asfáltica Morna, Reclaimed Asphalt Pavement, Deformação Permanente, Sustentabilidade.

ABSTRACT

Considering the large use of natural resources in the transportation sector, the need to develop sustainable technologies has become increasingly urgent. Some factors must be taken into consideration when choosing these technologies, including the climate, structure, traffic, among other points that will influence the durability and comfort provided by the pavement. This work evaluates the mechanical performance, with regard to permanent deformation, of five types of asphalt mixtures: conventional hot, warm, warm with the use of milled material, with and without rejuvenating agent, and hot with milled material and rejuvenating agent. The FlexPave 1.1 program was used to simulate the mechanical performance of these mixtures in a flexible pavement structure and for different climatic and traffic conditions. The results obtained demonstrated the influence of climatic conditions on the durability and performance of asphalt pavements, depending on the type of mixture adopted. The results also highlighted the importance of considering environmental aspects together with the appropriate selection of materials and the method of producing asphalt mixtures to generate resistant and long-lasting pavements.

KEY WORDS: Warm Asphalt Mixture, Reclaimed Asphalt Pavement, Permanent Deformation, Sustainability

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, clararayssasouza@gmail.com; bruno.mota@coc.ufrj.br; marcoslr94@gmail.com; fthiago@coc.ufrj.br

⁵CENPES / Petrobras, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, luisnascimento@petrobras.com.br



DOI: [10.29327/1430212.49-63](https://doi.org/10.29327/1430212.49-63)

ANÁLISE DOS EFEITOS DO CLIMA, DO TRÁFEGO E DO TIPO DE MISTURA NA
DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a Pesquisa CNT de Rodovias tem demonstrado que as condições das estradas pavimentadas no Brasil ainda requerem considerável melhoria em termos de desempenho. Este fato é corroborado pelo ranking de competitividade global do Fórum Econômico Mundial, onde o Brasil foi classificado em 93º lugar entre 141 países no que diz respeito à qualidade das rodovias. Este ranking avalia índices de conectividade e as condições operacionais das vias, colocando o Brasil em posição inferior a outros países da América Latina (CNT, 2021).

As atividades relacionadas à construção e à reabilitação do sistema viário consomem consideráveis quantidades de energia e recursos naturais, gerando resíduos e emitindo gases do efeito estufa. A busca por práticas ambientalmente conscientes está diretamente ligada à adoção de materiais sustentáveis e requer avanços tecnológicos para melhorar o desempenho sem comprometer a qualidade da pavimentação. Além disso, certos processos operacionais, como a usinagem e a compactação de misturas, demandam altas temperaturas, variando entre 140°C e 180°C.

Diante disso, a necessidade de promover no setor de pavimentação a adoção de novos processos e tecnologias capazes de reduzir os impactos ambientais e alinhados à busca pela eficiência energética e redução das emissões de poluentes impulsionou o surgimento das misturas asfálticas mornas, também conhecidas como *Warm Mix Asphalt* (WMA). As WMAs oferecem benefícios ambientais significativos, como a redução de 18% a 30% no consumo de energia, devido às temperaturas mais baixas de produção e compactação em comparação com as misturas convencionais a quente [Hamzah *et al.*, 2010; Rodríguez-Alloza *et al.*, 2015; Almeida-Costa e Benta, 2016].

Seguindo esse movimento de conscientização ambiental, o setor de pavimentação tem se voltado também para a produção de misturas asfálticas utilizando pavimento reciclado, conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Estudos sobre a viabilidade técnica do RAP em misturas asfálticas confirmam que o desempenho geralmente é comparável ao das misturas convencionais e, em alguns casos, pode até ser superior (Freire *et al.*, 2014). No entanto, a quantidade média de RAP incorporada nas misturas asfálticas permanece limitada a teores mais baixos. Nos EUA, a média anual de uso de RAP fresado aumentou de 15,6% para 21,1% entre 2009 e 2019 (Brett, 2020).

Apesar dos inúmeros benefícios, essas tecnologias sustentáveis ainda são subutilizadas na indústria brasileira de asfaltos, e uma das razões para isso é a incerteza em relação aos efeitos a longo prazo. Nesse contexto, este estudo avalia o desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil no que diz respeito à deformação permanente atrelada ao problema de afundamento de trilha de roda, por meio de simulações estruturais utilizando a ferramenta FlexPave 1.1. As análises consideram os efeitos de variáveis relevantes, como clima, intensidade do tráfego e tipo de mistura asfáltica, no desempenho da estrutura do pavimento. Espera-se que pesquisas como esta incentivem o uso de materiais sustentáveis em projetos de pavimentação, proporcionando ganhos ambientais sem comprometer o desempenho das estruturas.

METODOLOGIA

Produção das Misturas Asfálticas

Foram utilizados os seguintes materiais na composição das misturas: ligante, aditivo surfactante para a produção das misturas mornas, Agente Rejuvenecedor (AR), agregados de origem pétreo e RAP. Após a seleção dos materiais, foi realizada a caracterização física dos agregados e do RAP para a determinação de suas propriedades. Em seguida, os ligantes puro, modificado com agente surfactante e recuperado do RAP também foram caracterizados.

As misturas foram dosadas considerando a metodologia Superpave, de acordo com a Norma AASHTO M323 (2017) e ensaiadas para a avaliação do seu comportamento mecânico. Adicionalmente, foram realizadas simulações estruturais no FlexPave 1.1 para avaliar os efeitos das características dos materiais nas respostas da estrutura de um pavimento.



O ligante adotado na composição das misturas asfálticas foi um CAP 50/70 (Resolução ANP 897, 2022), classificado como PG 64S-22. O aditivo utilizado para a produção das misturas mornas é de base surfactante, possibilitando a diminuição das temperaturas de usinagem e compactação, sem interferir nas propriedades reológicas do ligante. O teor de incorporação ao ligante adotado foi de 0,35%, conforme indicação da própria fornecedora. Para as misturas mornas, foi recomendado pela fornecedora do aditivo surfactante que as temperaturas de usinagem e compactação fossem diminuídas em 30°C com relação às temperaturas das misturas quentes, como indicado na Tabela 1. Mais informações de caracterização do ligante asfáltico podem ser encontradas em Souza (2023).

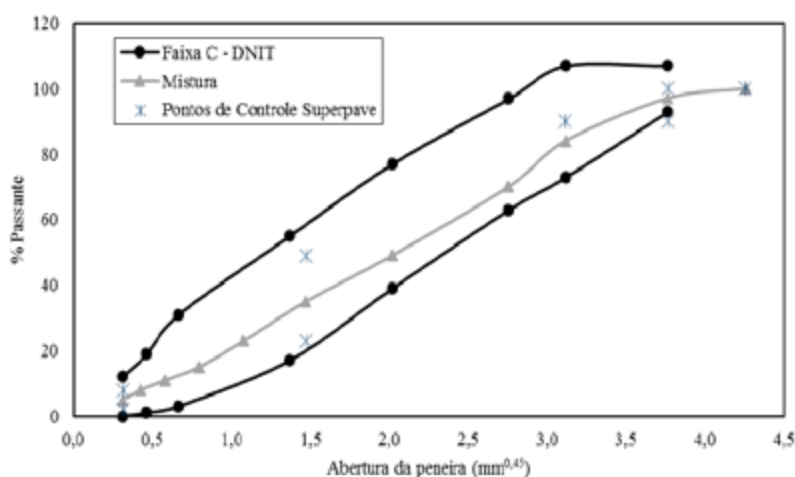
Tabela 1. Faixas de temperatura de usinagem e compactação - CAP 50/70

Mistura	Temperaturas		
	Usinagem	Agregados	Compactação
Quente	147°C a 150°C	157°C a 160°C	135°C a 140°C
Morna	117°C a 120°C	127°C a 130°C	105°C a 110°C

A dosagem do teor do AR usado em algumas misturas com RAP foi realizada considerando características do ligante recuperado. A recuperação do material foi feita usando um equipamento Rotarex, seguindo o Método Abson (ASTM D1856).

O AR utilizado nessa pesquisa foi o AnovaTM 1815, fornecido pela empresa Cargill. Trata-se de um óleo de base vegetal modificado que objetiva melhorar a durabilidade e a resistência ao trincamento das misturas asfálticas, além de proporcionar uma boa compatibilidade com o asfalto, principalmente no que diz respeito ao material envelhecido ou oxidado. Com relação à dosagem do AR, a ficha de informações do produto indica que geralmente os teores de dosagem do AnovaTM 1815 variam de 0,25% a 6,0% com relação à massa do ligante, dependendo do teor de RAP e das características do ligante virgem e do recuperado. Nesta pesquisa, a dosagem do agente rejuvenescedor foi realizada pela própria empresa fornecedora do material a partir da técnica de *blending charts*, chegando a um teor de 1,8%. Na composição das misturas, também foi usado um agregado do tipo gnaíse.

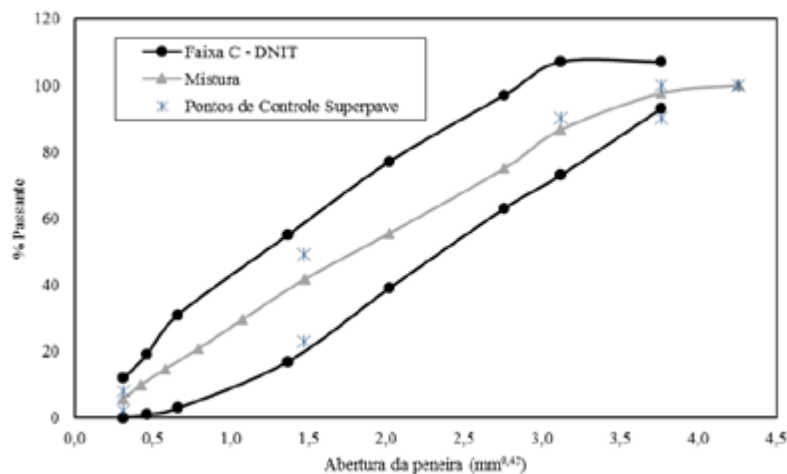
As curvas granulométricas das misturas com e sem RAP são apresentadas nas Figuras 1a e 1b.



(a) Sem RAP



DOI: 10.29327/1430212.49-63

ANÁLISE DOS EFEITOS DO CLIMA, DO TRÁFEGO E DO TIPO DE MISTURA NA
DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

(b) Com RAP

Figura 1. Curvas de distribuição granulométrica das misturas: a) sem e b) com RAP

O RAP utilizado nesta pesquisa foi disponibilizado pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro. Contudo, não foi possível obter informações do pavimento de origem do qual o material foi fresado. Para as misturas com fresado, 20% da massa retida foi substituída pelo RAP.

A seleção granulométrica considerou a metodologia Bailey. Para isso, como mostra a Tabela 2, foram definidos os parâmetros de análise da Norma DNIT 438 (2022), que consistem na Proporção de Agregados Graúdos (AG), na Proporção Graúda dos Agregados Finos (GAF) e na Proporção Fina dos Agregados Finos (FAF).

Tabela 2. Parâmetros da metodologia Bailey

TMN (mm)	Proporção	Valor	Limite Inferior	Limite Superior
19	AG	0,700	0,6	1,0
	GAF	0,469	0,35	0,5
	FAF	0,478	0,35	0,5

No total, foram avaliadas as cinco misturas asfálticas identificadas na Tabela 3.

Tabela 3. Características das misturas asfálticas avaliadas nesta pesquisa

Mistura	Característica			
	Temperatura	Ligante	% de RAP	Presença do AR
M1	Quente	CAP 50/70	0	Ausente
M2	Morna	CAP 50/70	0	Ausente
M3	Morna	CAP 50/70	20	Ausente
M4	Morna	CAP 50/70	20	Presente
M5	Quente	CAP 50/70	20	Presente



A metodologia de dosagem Superpave foi utilizada para as misturas desta pesquisa considerando um nível de tráfego de médio a alto e um Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,0 mm. Foram realizadas duas dosagens, uma para as misturas sem a incorporação de RAP e outra para as misturas com RAP.

Stress Sweep Rutting (SSR)

Os corpos de provas moldados para a realização deste ensaio tiveram dimensões de 15 cm de altura por 10 cm de diâmetro e volume de vazios de 7,0% +/- 0,5%. O ensaio foi realizado de acordo com a Norma AASHTO TP 134 (2018). Também foi considerado o protocolo proposto por KIM et al. (2017). O ensaio foi conduzido em duas temperaturas, uma alta (TA) de 54°C e outra baixa (TB) de 20°C, sob pressão de confinamento constante de 69 KPa (10 psi), com três blocos de carregamento de 200 ciclos, cada um para um nível diferente de tensão desvio.

Pelo menos duas réplicas foram ensaiadas para cada temperatura e a diferença relativa da deformação plástica ao final do ensaio entre as réplicas foi inferior a 25%. A deformação axial permanente que ocorre em cada ciclo de carga foi medida usando o deslocamento do atuador. A Figura 2 apresenta um corpo de prova montado para a realização do ensaio SSR.



Figura 2. Corpo de prova para o ensaio de SSR

Simulações no FlexPave 1.1

Foram realizadas 75 simulações para prever o nível de Afundamento de Trilha de Roda (ATR) de uma estrutura fixa de pavimento, representada pela Figura 3, variando-se os parâmetros da mistura asfáltica da camada de revestimento, o tráfego e o clima.

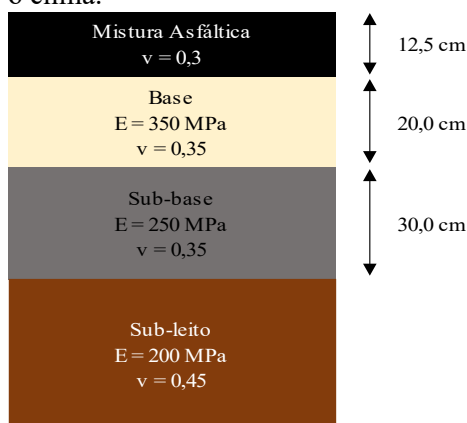


Figura 3. Estrutura de pavimento considerada para as simulações



DOI: 10.29327/1430212.49-63

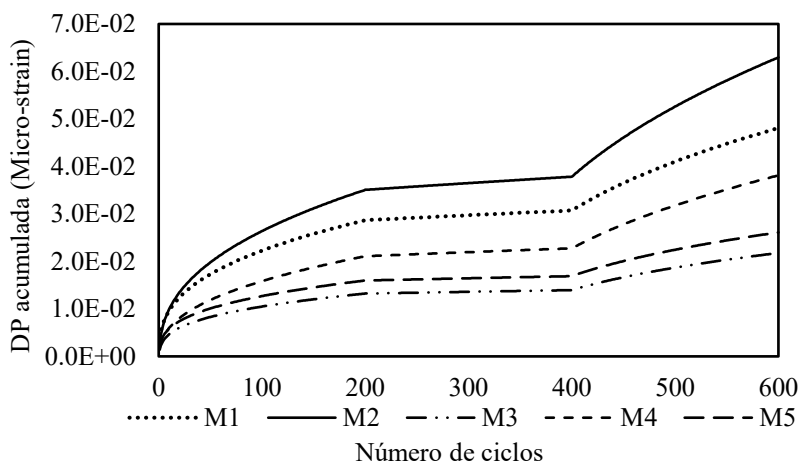
ANÁLISE DOS EFEITOS DO CLIMA, DO TRÁFEGO E DO TIPO DE MISTURA NA
DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Para o tráfego, foram simuladas três situações: (i) leve com N de 3×10^5 ; (ii) médio com N de 3×10^6 e (iii) muito pesado com um N de 3×10^8 (Prefeitura de São Paulo, 2004). Com relação ao clima, dadas as dimensões continentais do Brasil, foi escolhida uma capital representativa de cada região, a saber: (i) Manaus na Região Norte; (ii) Natal na Região Nordeste; (iii) Goiás na Região Centro-Oeste; (iv) Rio de Janeiro na Região Sudeste e (v) Porto Alegre na Região Sul. As temperaturas destas cidades foram consideradas de acordo com o painel climático do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

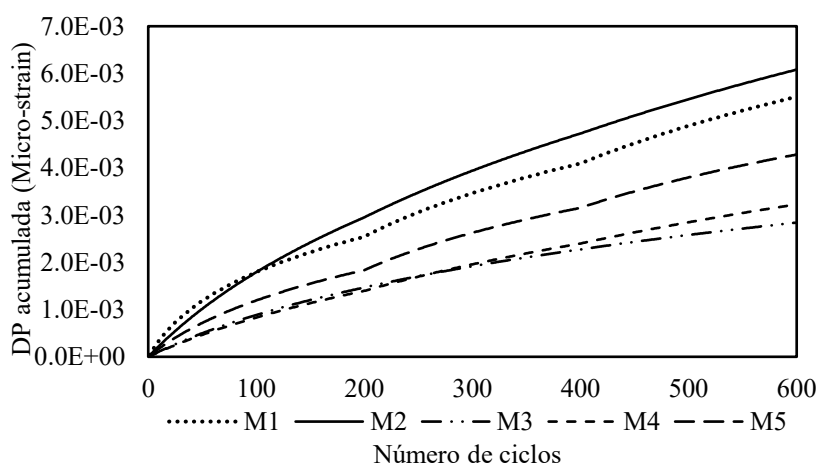
Já para obter o perfil de temperatura do pavimento, utilizou-se o EICM do FlexPave. Os dados climáticos para cada região do país foram obtidos no LTPP InfoPave na seção MERRA *climate data for MEPDG inputs* da FHWA.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios triaxiais SSR realizados para as cinco misturas analisadas são apresentados na Figura 4 (a) para a temperatura alta de 54°C e na Figura 4 (b) para a temperatura baixa de 20°C.



(a) Temperatura alta (54°C)

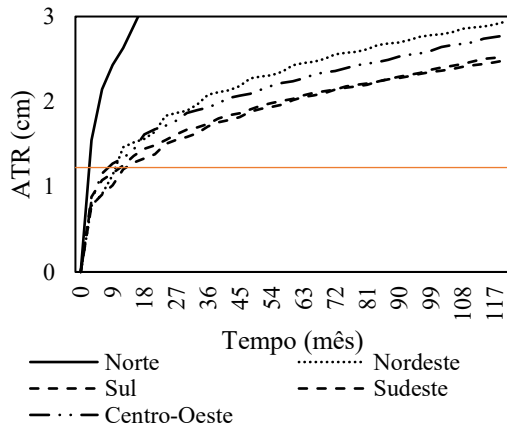




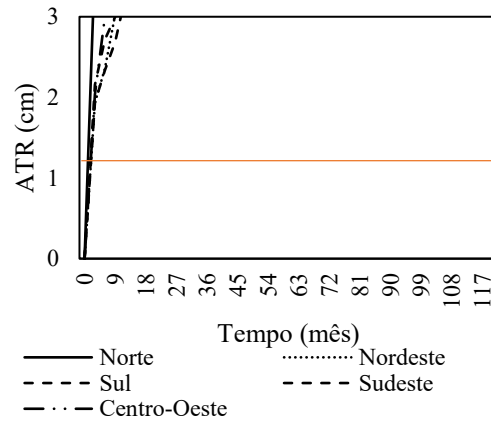
Clara Rayssa Romero Rodrigues Souza, Bruno Cavalcante Mota, Marcos Lamha Rocha, Francisco Thiago Sacramento Aragão & Luis Alberto Herrmann do Nascimento

(b) Temperatura baixa (20°C)

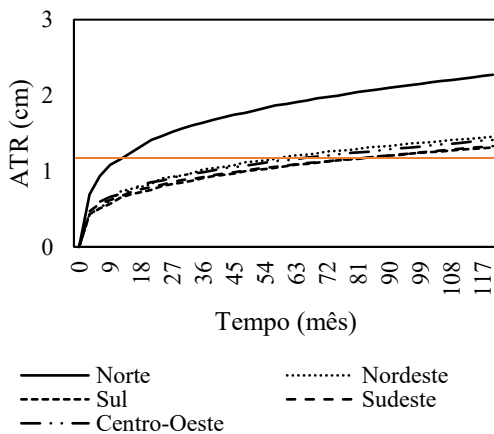
Figura 1: Resultados do SSR



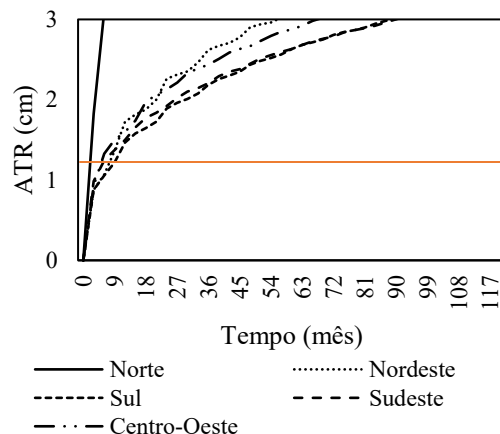
(a) M1



(b) M2



(c) M3

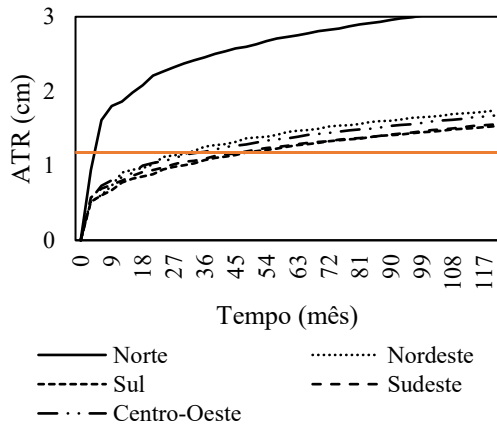


(d) M4



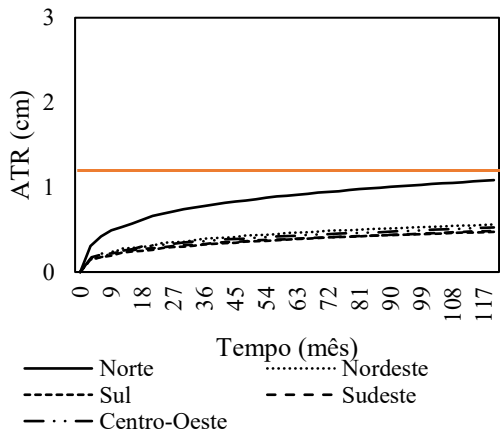
DOI: 10.29327/1430212.49-63

ANÁLISE DOS EFEITOS DO CLIMA, DO TRÁFEGO E DO TIPO DE MISTURA NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

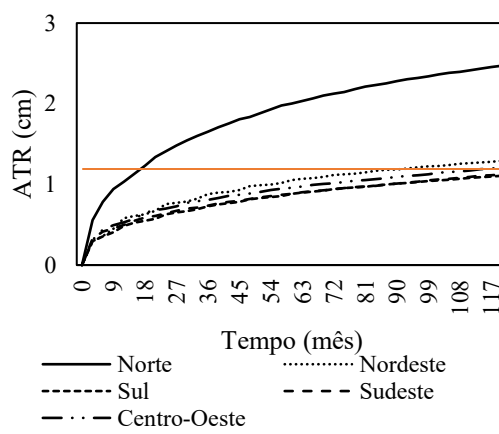


(e) M5

Figura 5. ATR para o tráfego pesado



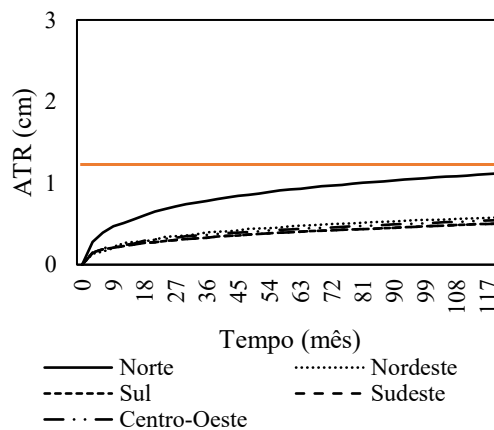
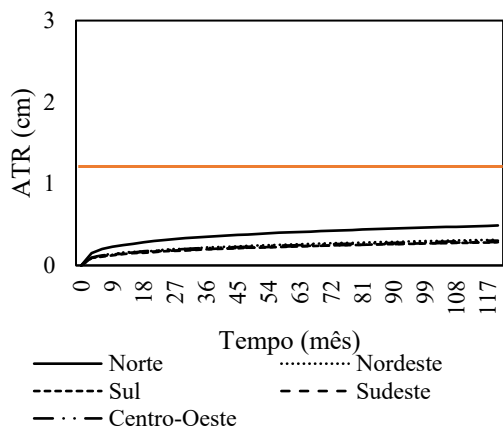
(a) M1



(b) M2

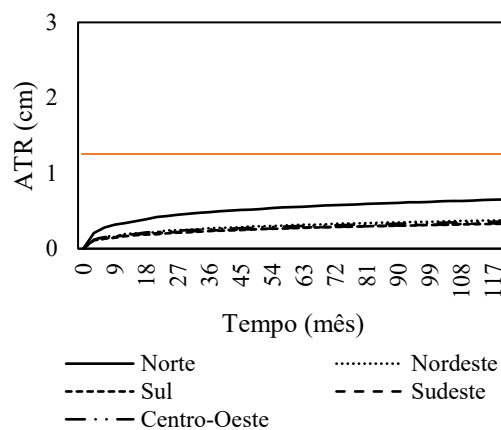


Clara Rayssa Romero Rodrigues Souza, Bruno Cavalcante Mota, Marcos Lamha Rocha, Francisco Thiago Sacramento Aragão & Luis Alberto Herrmann do Nascimento



(c) M3

(d) M4



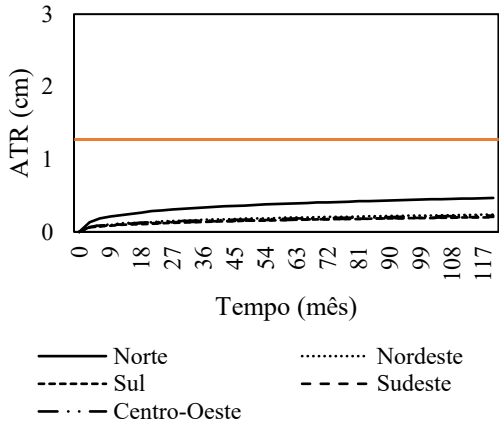
(e) M5

Figura 6. ATR para o tráfego médio

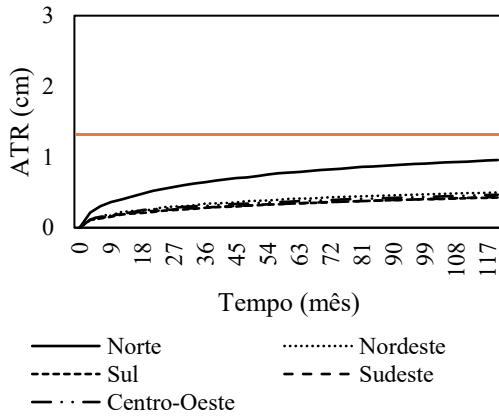


DOI: 10.29327/1430212.49-63

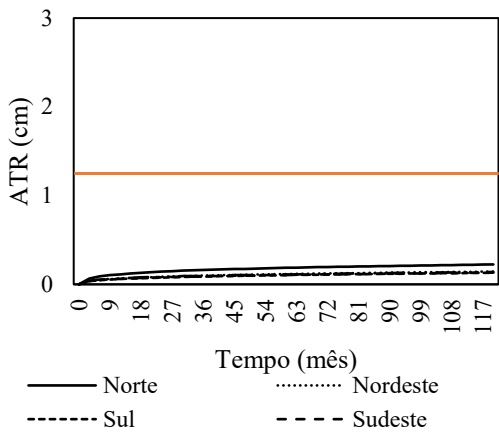
ANÁLISE DOS EFEITOS DO CLIMA, DO TRÁFEGO E DO TIPO DE MISTURA NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS



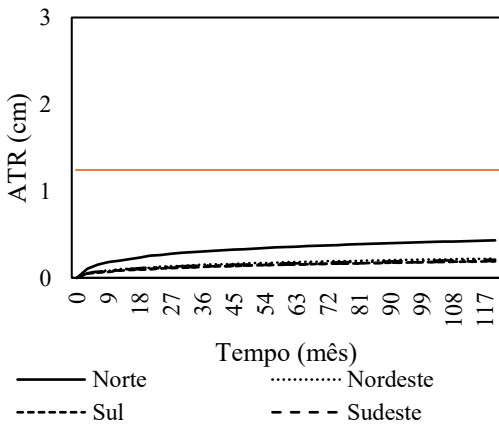
(a) M1



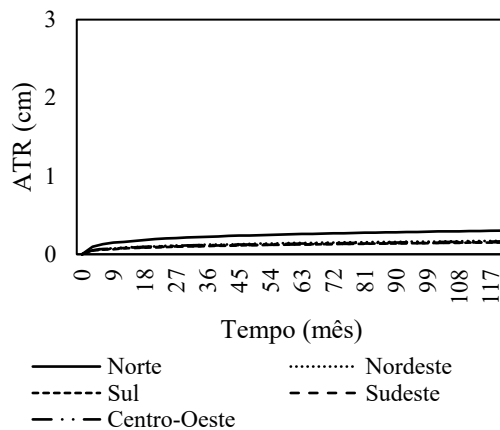
(b) M2



(c) M3



(d) M4



(e) M5

Figura 7. ATR para o tráfego leve

Considerando o clima, percebe-se que os menores valores de ATR foram obtidos para as regiões Sul e Sudeste. Isso ocorre em razão de temperaturas mais amenas em algumas partes do ano. No sentido oposto, a Região Norte, representada pela cidade de Manaus, foi a que apresentou o maior valor de ATR, devido às suas altas temperaturas.

Quando se analisa o tráfego, apenas para o menor N as condições de limite de ATR foram atendidas, resultando em valores menores que 1,25 cm. Para o tráfego elevado, nos meses iniciais, a Mistura 2 (morna) já apresentaria afundamentos próximos da espessura total da camada de revestimento. Essa mistura foi a que apresentou o pior comportamento em todas as situações analisadas.

Para o tráfego médio, apenas as Misturas M2 (morna) e M4 (morna com RAP e com AR) não atenderam ao critério de ATR máximo de 1,25 cm. Essa situação ocorreu apenas para a Região Norte, que possui temperaturas mais elevadas. Essas temperaturas mais elevadas tendem a deixar as misturas mais susceptíveis ao acúmulo de deformação permanente, especialmente por terem sido compactadas em menores temperaturas (misturas mornas).

Considerando o revestimento, as Misturas M2 (morna) e M4 (morna com RAP e com AR) apresentaram maior susceptibilidade ao dano causado pela deformação permanente, já que os ligantes foram expostos a menores temperaturas de usinagem e compactação, implicando em um menor envelhecimento e enrijecimento. Vale salientar que a análise feita considerando as temperaturas de usinagem e de compactação é diferente da análise feita a respeito da influência do clima região estudada. O uso do RAP minimizou o ATR, como é possível observar para as Misturas M3 (morna com RAP) e M5 (quente com RAP e AR), ao proporcionar maior rigidez. Por sua vez, o uso do AR resultou em maior sensibilidade a este tipo de defeito, como observado para a Mistura M4 (morna com RAP e com AR), tendo em vista que sua função é a de otimizar parâmetros relacionados ao trincamento, o que é proporcionado pela redução da rigidez conferida pelo uso do RAP.

Ao analisar o uso do RAP atrelado ao efeito da temperatura, percebe-se que por conferir maior rigidez à mistura, o uso do fresado implicou em uma menor deformação permanente, principalmente para a Mistura M3, que é morna e sem o agente rejuvenescedor.

CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil no que diz respeito à deformação permanente atrelada ao problema de afundamento de trilha de roda, por meio de simulações estruturais utilizando a Ferramenta FlexPave 1.1. As análises consideraram os efeitos de variáveis relevantes, como clima, intensidade do tráfego e tipo de mistura asfáltica, no desempenho da estrutura do pavimento.



DOI: [10.29327/1430212.49-63](https://doi.org/10.29327/1430212.49-63)

ANÁLISE DOS EFEITOS DO CLIMA, DO TRÁFEGO E DO TIPO DE MISTURA NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Os resultados indicaram a forte influência do clima na durabilidade das misturas asfálticas, com as Regiões Sul e Sudeste apresentando menores valores de ATR devido às suas temperaturas mais amenas. A Região Norte, representada no estudo pela cidade de Manaus, apresentou o pior desempenho, como consequência de altas temperaturas. Além disso, em condições de tráfego intenso, ocorreram afundamentos próximos à espessura total da camada de revestimento, especialmente em misturas compactadas em temperaturas mornas sem RAP.

A análise da sensibilidade da mistura à temperatura de usinagem e compactação e ao tipo de revestimento destacou que as Misturas M2 (morna sem RAP) e M4 (morna com RAP e AR) foram mais suscetíveis ao dano causado pela deformação permanente devido à exposição dos ligantes a menores temperaturas de usinagem e compactação, resultando em um menor envelhecimento e enrijecimento. O uso de RAP minimizou o ATR, conferindo maior rigidez. Isso evidencia a importância da seleção adequada dos materiais e técnicas de construção para garantir a durabilidade do pavimento.

O benefício do uso do RAP associado ao efeito da temperatura ressaltou que a utilização de RAP conferiu maior rigidez às misturas, resultando em menor deformação permanente, especialmente para a mistura compactada em temperatura morna e sem o agente rejuvenescedor. Isso sugere que o uso de material fresado e a reciclagem de materiais asfálticos podem contribuir significativamente para a sustentabilidade do pavimento, reduzindo a necessidade de novos materiais e minimizando o impacto ambiental associado à produção de asfalto convencional.

Por fim, os resultados evidenciam uma grande oportunidade para a adoção de técnicas de dosagem balanceada, que induzem à seleção otimizada dos materiais para gerar misturas com desempenho mecânico superior.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do CENPES/PETROBRAS.

REFERÊNCIAS

AASHTO M 323: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, 30th Ed., AASHTO, Washington, DC. 2017.

ALMEIDA-COSTA, A., BENTA, A. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*. 112, 2308e2317. 2016.

ANP. Resolução ANP nº 897. 2022. Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-897-de-18-de-novembro-de-2022-445759308>>.

ASTM D1856 – 09. Recovery of Asphalt from solution by Abson method. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2015.

BRETT, A. W.; Willis, J. R.; Shacat, J. Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2019. 10th Annual Survey Final Report. National Asphalt Pavement Association, 2020.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2021. Brasília: CNT, SEST, SENAT, 2021. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER). Glossário de Termos da Qualidade. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

DNIT 438/2022 - ME. Pavimentação - Misturas Asfálticas - Seleção Granulométrica de agregados para concreto asfáltico pelo Método Bailey - Procedimento. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2022. DNIT 416/2019 - ME. Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do módulo dinâmico - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.



Clara Rayssa Romero Rodrigues Souza, Bruno Cavalcante Mota, Marcos Lamha Rocha,
Francisco Thiago Sacramento Aragão & Luis Alberto Herrmann do Nascimento

HAMZAH, M.O., JAMSHIDI, A., SHAHADAN, Z. Evaluation of the potential of Sasobit® to reduce required heat energy and CO2 emission in the asphalt industry. *Journal of Cleaner Production*. 18, 1859e1865. 2010.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. IP – 02/2004 CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS, 2004.

RODRÍGUEZ-ALLOZA, A.M., MALIK, A., LENZEN, M., GALLEGO, J. Hybrid input-output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures. *J. Clean. Prod.* 90, 171e182, 2015.

FREIRE, J.; GÓIS, T.S.; DOMINICINI, W.K.; LUTIF, J. O estado da arte sobre uso de reciclado de pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo. XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Curitiba, nov., 2014.

SOUZA, C. R. R. R. Análise do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas Quentes e Mornas Produzidas com Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Usando a Abordagem de Dano Contínuo Viscoelástico. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

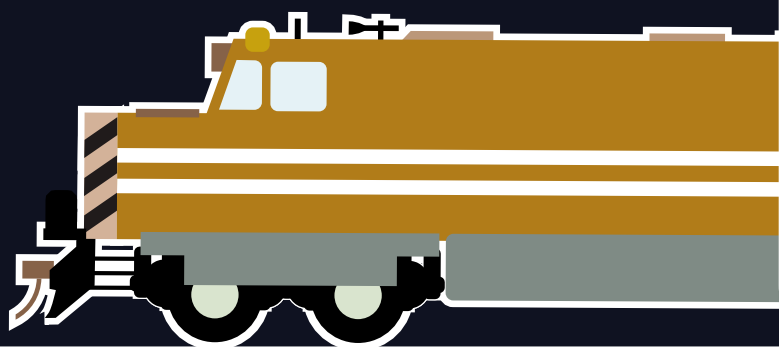


26º Enacor 49ª RAPV

Encontro Nacional de
Conservação Rodoviária
e Reunião Anual de Pavimentação

Aracaju / Sergipe | 19 a 22 ago 2024

www.rapvenacor.com.br



ABDER



**AVANÇOS TECNOLÓGICOS
E METODOLOGIAS NA
PAVIMENTAÇÃO E GESTÃO
RODOVIÁRIA**

PROGRAMAÇÃO
TRABALHOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS E ESTUDOS DE CASOS DE OBRAS
Quinta-feira, 22 de agosto

SALA CAUEIRA		
AVANÇOS TECNOLÓGICOS E METODOLOGIAS NA PAVIMENTAÇÃO E GESTÃO RODOVIÁRIA (ST12)		
⌚ 09:00	EC470	ADEQUAÇÃO DO PLANO DE IMPLANTAÇÃO BIM DO DER/PR EM DECORRÊNCIA DA NOVA LEI DE LICITAÇÕES E CONTRATOS ADMINISTRATIVOS
⌚ 09:20	TT867	FLUXO DE TRABALHO PARA ORÇAMENTAÇÃO EM BIM DE OBRAS RODOVIÁRIAS
⌚ 09:40	TT689	INDICADORES DE DESEMPENHO COMO FERRAMENTA DE SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO PARA A GERÊNCIA DE ESTRUTURAS NO ÂMBITO DO DNIT
⌚ 10:20	EC837	INSPEÇÕES EM OBRAS DE ARTE ESPECIAIS DA MALHA RODOVIÁRIA DO ESPÍRITO SANTO
⌚ 10:40	EC560	CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DEFLECTOMÉTRICOS OBTIDOS COM VIGA BENKELMAN E DEFLECTÔMETRO DE PESO LEVE (LWD): ESTUDO DE CASO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PAVIMENTO
⌚ 11:00	EC773	ANÁLISE DA MALHA RODOVIÁRIA FEDERAL BRASILEIRA USANDO PARÂMETROS OBTIDOS COM O ENSAIO DE FWD
⌚ 11:20	EC641	AVANÇOS TECNOLÓGICOS E CONTROLE DE QUALIDADE NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA
⌚ 11:40	TT903	CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DA COMPACTAÇÃO IN SITU DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS
⌚ 12:00	TT241	UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO E DA CLASSIFICAÇÃO MCT PARA CARACTERIZAR AS LATERITAS UTILIZADAS EM BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE



ADEQUAÇÃO DO PLANO DE IMPLANTAÇÃO BIM DO DER/PR EM DECORRÊNCIA DA NOVA LEI DE LICITAÇÕES E CONTRATOS ADMINISTRATIVOS

Leonardo da Silva Azevedo²; Larissa Vieira¹; Débora dos Santos Alves²; Lucas Rattmann Vieira Theulen²; Bruno Heimbecker Liberato¹; André Luis Rehbein Boza² & Silvana Bastos Stumm¹.

RESUMO

A metodologia *Building Information Modelling* (BIM) aplicada em projetos de infraestrutura rodoviária permite simular a construção de forma colaborativa em um ambiente virtual, possibilitando prever e mitigar possíveis interferências que possam surgir durante a realização da obra, evitando retrabalhos. Estruturar esse processo faz-se necessário para garantir a criação de um ambiente propício para a utilização da metodologia. Assim, o Plano de Implantação BIM institucional desempenha um papel essencial ao orientar e garantir a execução adequada das ações planejadas. Neste sentido, a pesquisa pretende apresentar um relato das etapas de implantação do BIM no Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER/PR) e sua atualização para atender as exigências da regulamentação da nova Lei de Licitações e Contratos Administrativos no Estado do Paraná. A pesquisa é descritiva e para a coleta dos dados foram realizadas consultas aos materiais e planejamentos anteriores para implantação do BIM no órgão, e pesquisas bibliográficas sobre o tema. Esta pesquisa buscou apresentar os motivos que tornaram necessário adequar e organizar o processo de implantação do BIM no DER/PR. Além disso, é importante reconhecer que o êxito da implantação está além da utilização de novas tecnologias. É indispensável um compromisso com a mudança cultural da organização, uma visão de longo prazo e investimentos em capacitação e desenvolvimento das equipes.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem da Informação da Construção; Adequação Plano de Implantação BIM; Infraestrutura rodoviária; Lei de Licitações e Contratos Administrativos.

ABSTRACT

The Building Information Modeling (BIM) methodology applied to road infrastructure projects allows you to simulate construction collaboratively in a virtual environment, making it possible to predict and mitigate possible interferences that may arise during the execution of the work, avoiding rework. Structuring this process is necessary to ensure the creation of an environment conducive to the use of the methodology. Thus, the institutional BIM Implementation Plan plays an essential role in guiding and ensuring the adequate execution of planned actions. In this sense, the research intends to present a report on the stages of BIM implementation in the Department of Highways of Paraná (DER/PR) and its updating to meet the requirements of the regulation of the new Law on Tenders and Administrative Contracts in the State of Paraná. The research is descriptive and to collect data, consultations were carried out on materials and previous plans for implementing BIM in the agency, and bibliographical research on the topic. This research sought to present the reasons that made it necessary to adapt and organize the BIM implementation process in DER/PR. Furthermore, it is important to recognize that successful implementation goes beyond the use of new technologies. A commitment to cultural change in the organization, a long-term vision and investments in team training and development are essential.

KEY WORDS: Building Information Modelling; BIM Implementation Plan Adequacy; Road Infrastructure; Bidding and Administrative Contracts Law.

¹ Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná, larissavieira@der.pr.gov.br; brunoliberato@der.pr.gov.br; silvanastumm@der.pr.gov.br.

² Consórcio TS-029 lotado no Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná, leonardoazevedo@der.pr.gov.br; deboradossantos@der.pr.gov.br; lucastheulen@der.pr.gov.br; andreboza@der.pr.gov.br.



INTRODUÇÃO

A aplicação da metodologia *Building Information Modelling* (BIM), ou a Modelagem da Informação da Construção em projetos de infraestrutura rodoviária permite a simulação colaborativa da construção em um ambiente virtual. Isso ajuda na antecipação e resolução de possíveis problemas que possam surgir durante a execução da obra (EASTMAN *et al.*, 2008; PARANÁ, 2022a).

Para criar um cenário propício para o uso desta metodologia, é necessário um planejamento inicial e, a partir do momento em que houver alterações na estrutura de aplicação e ações, deve-se atualizar o planejamento. Dessa forma, o Plano de Implantação BIM institucional é o documento que conduz e assegura a correta execução das ações do planejamento (PARANÁ, 2022a).

Neste sentido, o Plano de Implantação BIM do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER/PR) foi elaborado com base nos pilares fundamentais da metodologia BIM: tecnologias, políticas e processos (SUCCAR, 2009). O plano também foi organizado em etapas: Etapa 1 - Adoção; Etapa 2; e Etapa 3, consoantes às Estratégias BIM Nacional e Estadual, estabelecidas pelo Decreto Federal n.º 11.888/2024 e pelo Decreto Estadual n.º 3.080/2019, respectivamente, e com o que determina a Lei Federal n.º 14.133/2021 (a *nova* Lei de Licitações) e o Decreto Estadual n.º 10.086/2022, que regulamenta a Lei de Licitações no âmbito do estado do Paraná (PARANÁ, 2022a). Assim, esta pesquisa pretende apresentar um relato da adequação das etapas de implantação da metodologia BIM no DER/PR e sua atualização em decorrência da regulamentação da nova Lei de Licitações e Contratos Administrativos no âmbito do Estado do Paraná. É necessário reestruturar os procedimentos existentes na metodologia BIM, compreender as ferramentas a serem utilizadas e promover a comunicação e colaboração entre diferentes cenários, além de capacitar a equipe para novos formatos de análise e fiscalização de projetos e obras.

A LEI N.º 14.133/2021 E O REGIME DE CONTRATAÇÕES INTEGRADAS

A Lei Federal n.º 14.133/2021, sancionada em 1º de abril de 2021, denominada Lei de Licitações e Contratos Administrativos, ao substituir as Leis n.º 8.666/1993, 10.520/2002 e os artigos 1º ao 47-A da Lei n.º 12.462/2011, consolidou de maneira clara e objetiva as normas gerais para os processos licitatórios e contratações públicas, estabelecendo critérios e diretrizes que visam promover uma gestão mais eficiente e transparente dos recursos públicos.

Com o advento da Lei, novas modalidades foram criadas e outras foram extintas, sendo vigentes as modalidades: pregão, concorrência, concurso, leilão e diálogo competitivo. Além disso, destaca-se a ênfase na utilização do regime de contratações integradas e na adoção da metodologia BIM nas contratações de obras e serviços de engenharia e arquitetura (BRASIL, 2021).

Assim, o artigo 19, inciso V, parágrafo 3º, da Lei determina, sempre que adequada ao objeto da licitação, adotar preferencialmente a metodologia BIM ou tecnologias e processos integrados similares ou mais avançados que venham a substituí-la, no caso das licitações de obras e serviços de engenharia e arquitetura, sendo a metodologia aplicada nas modalidades previstas (BRASIL, 2021). As modalidades não foram mantidas como eram nas leis antecessoras, e o pregão não é mais aplicável às contratações de serviços técnicos especializados de natureza predominantemente intelectual, como obras e serviços de engenharia. Na descrição da concorrência constante na Lei, fica implícita a indicação para contratação de serviços de engenharia, tanto intelectuais quanto executivas, quando não enquadrados na alínea “a” do inciso XXI do *caput* do art. 6º. Na modalidade concurso, o vencedor deverá transferir todos os direitos patrimoniais relativos ao projeto e autorizar juízo de conveniência



[DOI: 10.29327/1430212.49-72](https://doi.org/10.29327/1430212.49-72)

ADEQUAÇÃO DO PLANO DE IMPLANTAÇÃO BIM DO DER/PR EM
DECORRÊNCIA DA NOVA LEI DE LICITAÇÕES E CONTRATOS ADMINISTRATIVOS

à administração pública, para manuseio das autoridades competentes. O leilão é cometido por leiloeiro oficial, que vem por adoção dos concorrentes credenciados pela modalidade pregão, porém será adotado o critério de julgamento de maior desconto, utilizando como máximo os parâmetros percentuais da lei. Já, o diálogo competitivo trata da contratação de soluções específicas pela própria administração sem adaptar soluções disponíveis no mercado (BRASIL, 2021).

Inspirada no Regime Diferencial de Contratação (RDC), estabelecido pela Lei n.º 12.462/2011, a Lei n.º 14.133/2021 incorporou o conceito de contratação integrada, visando reduzir o tempo e os custos associados aos processos de contratação e construção. Esse regime de execução de obras e serviços de engenharia integra as responsabilidades pela elaboração dos projetos básico e executivo; execução da obra e serviços de engenharia, fornecimento de bens e serviços especiais e realização de montagem, teste, pré-operação e demais atividades necessárias, simplificando as operações e minimizando os riscos de atrasos e custos adicionais (BRASIL, 2021).

Ainda, o conteúdo do documento apresenta um novo regime, o semi-integrado, que flexibiliza a contratação integrada ao permitir que o contratado apresente soluções para a obra, desde que assuma integralmente os riscos associados às alterações do projeto básico. Essa medida visa promover a eficiência e a qualidade nas obras públicas, incentivando a busca por soluções econômicas e sustentáveis.

Desta forma, a responsabilidade pela adoção dos regimes de contratação para os serviços de engenharia e obras fica a cargo de cada entidade pública, respeitando os critérios estabelecidos pela legislação federal. Essa flexibilidade permite uma adaptação adequada às necessidades específicas de cada instituição (BRASIL, 2021).

REGULAMENTAÇÃO DA LEI FEDERAL E A ADOÇÃO DO BIM NO ÂMBITO DO ESTADO DO PARANÁ

Em 2022, o Governo do Estado do Paraná instituiu o Decreto Estadual n.º 10.086, que regulamenta a Lei Federal n.º 14.133/2021 - Lei de Licitações e Contratos Administrativos no âmbito do Estado do Paraná, marcando um importante avanço nas licitações e contratações públicas no contexto estadual, além de promover a adoção da metodologia BIM (PARANÁ, 2022b).

O Decreto Estadual dedica o capítulo VII, seção I, para o uso de inovações e tecnologias para a contratação de obras e serviços de arquitetura e engenharia, estabelecendo diretrizes para a adoção do BIM. Uma das principais disposições é a obrigatoriedade na utilização da metodologia BIM em projetos de engenharia e arquitetura custeados com recursos do Governo do Estado do Paraná, desde que atendam aos critérios estabelecidos para a exigência da metodologia.

O artigo 513, estabelece que a exigência ocorrerá de forma gradual, obedecendo as seguintes fases: a partir de primeiro de janeiro de 2022 foi implementada a fase 1, compreendendo a etapa de projetos; no dia primeiro de janeiro de 2023 foi iniciada a fase 2, visando o acompanhamento de execução e fiscalização de obras; e em primeiro de janeiro de 2025 está previsto o início da fase 3, abrangendo operação e manutenção dos empreendimentos (PARANÁ, 2022b).

O Decreto n.º 10.086/2022 trouxe ainda a possibilidade de utilização do regime de contratações integradas para as licitações que exigirem o uso da metodologia BIM, conforme o artigo 519 do Decreto:



O instrumento convocatório que adotar os regimes de contratação integrada, semi-integrada ou de fornecimento com prestação de serviço associado, quando couber, deverá exigir o uso da metodologia BIM e/ou tecnologias compatíveis com a referida metodologia. (PARANÁ, 2022b).

Desta forma, as contratações realizadas contendo o uso da metodologia BIM se alinham perfeitamente com esse regime, pois as contratações integradas constituem um modelo que busca a integração entre o projeto e a execução da obra, impulsionando a economia nos processos licitatórios. Além disso, proporciona a realização de contratações de serviços e obras públicas de forma mais ágil, quando comparado a contratar separadamente a elaboração do projeto executivo e posteriormente a execução da obra.

Neste sentido, a adoção do BIM no contexto dessas normativas contribui significativamente para melhorar os processos construtivos, aumentar a qualidade dos projetos e das obras, e melhorar o uso dos recursos públicos (PARANA, 2022b).

ESTRATÉGIAS PARA DISSEMINAÇÃO DO BIM

A discussão sobre a implantação da metodologia BIM no âmbito nacional teve início efetivo em 2019 com o lançamento da Estratégia Nacional para Disseminação do BIM (BRASIL, 2019). No mesmo ano, o Governo do Estado do Paraná também instituiu sua estratégia e, frente aos avanços no que se refere às licitações e contratos públicos, em 2022 consolidou a exigência do BIM nas contratações de serviços e obras de engenharia (PARANÁ, 2019; PARANÁ, 2022b).

Estratégia BIM BR

A Estratégia BIM BR, inicialmente estabelecida pelo Decreto Federal n.º 9.983/2019, revogado pelo Decreto n.º 11.888 de 22 de janeiro de 2024, tem como objetivo modernizar e aprimorar os processos de planejamento, construção, operação e manutenção de edificações e obras civis, tornando-os mais eficientes e sustentáveis.

Uma das principais características da Estratégia BIM BR é sua abordagem ampla, que visa a adoção da tecnologia BIM e a transformação de processos e práticas de trabalho. Isso inclui a capacitação de profissionais, a padronização de procedimentos, a melhoria da qualidade e precisão de projetos, a redução de custos e prazos, além de aumentar a sustentabilidade e eficiência das obras.

A Estratégia também estabelece diretrizes para a criação e disponibilização de conteúdos e objetos BIM padronizados, a interoperabilidade entre diferentes *softwares* BIM e a integração de dados e informações. Para o gerenciamento criou-se o Comitê Gestor (CG-BIM), composto por representantes de diferentes órgãos, responsáveis por implementar e gerenciar a Estratégia (MDIC, 2018; BRASIL, 2024).

Estratégia BIM PR

Em conformidade com a Estratégia BIM BR, o Governo do Estado do Paraná instituiu o Decreto Estadual n.º 3.080, de 15 de outubro de 2019, atualizado pelo Decreto n.º 12.862/2022, que estabelece a Estratégia BIM PR: “*Paraná rumo à inovação digital nas obras públicas*” para o fomento e implantação do BIM no estado, com a finalidade de promover a inovação tecnológica para melhoria na qualidade de projetos e obras públicas (PARANÁ, 2019; PARANÁ, 2022c).

DOI: [10.29327/1430212.49-72](https://doi.org/10.29327/1430212.49-72)ADEQUAÇÃO DO PLANO DE IMPLANTAÇÃO BIM DO DER/PR EM
DECORRÊNCIA DA NOVA LEI DE LICITAÇÕES E CONTRATOS ADMINISTRATIVOS

O PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO BIM NO DER/PR

A disseminação do BIM no DER/PR é resultado das ações das Estratégias BIM Nacional e Estadual, bem como da Lei Federal n.º 14.133, que dedica um capítulo em prol da “preferência” pela adoção do BIM, e do Decreto Estadual n.º 10.086 que, da mesma forma, dedica um capítulo sobre a obrigatoriedade na utilização do BIM nas contratações de obras e serviços de engenharia (PARANÁ, 2024). A ilustração a seguir apresenta uma linha do tempo relacionada à legislação para disseminação do BIM, compreendendo os anos de 2019 a 2024.



Figura 1. Linha do tempo da legislação para disseminação do BIM (AUTORES, 2024)

O ano de 2019 marcou o advento da metodologia BIM no DER/PR. Durante esse período, o foco estava na pesquisa, produção de padrões, investimentos estratégicos em equipamentos, bem como na realização de treinamentos e na difusão da cultura organizacional em relação ao BIM. Todas essas iniciativas foram direcionadas especificamente para a aplicação da metodologia BIM em projetos de infraestrutura rodoviária.

Com o lançamento do Decreto Estadual n.º 10.086/2022, o foco inicial da implantação estava na contratação e fiscalização de projetos utilizando a metodologia BIM. Além disso, houve ênfase na estruturação dos dados para a operação, levando em consideração a necessidade de revisão dos processos, a demanda por tecnologia avançada e a capacitação das equipes. Esse direcionamento definiu os procedimentos para a implementação bem-sucedida da metodologia na contratação de projetos de infraestrutura rodoviária, garantindo uma abordagem integrada em todo o processo.

Inicialmente, realizou-se um trabalho de aculturação e treinamento interno, visando familiarizar os colaboradores com os princípios e práticas do BIM. Em paralelo, houve a criação de um Grupo de Trabalho interno (GT InfraBIM), dedicado a discutir estratégias de implantação e disseminação da metodologia dentro da organização, com membros de diversos setores da autarquia.

Para testar os conhecimentos e habilidades do BIM, o Projeto Piloto, específico para infraestrutura rodoviária, permitiu avaliar sua viabilidade e eficácia em situações reais. Simultaneamente, foram estabelecidos padrões e procedimentos para garantir a qualidade dos modelos BIM. Como resultado dessas ações, o DER/PR elaborou o Caderno BIM para infraestrutura rodoviária, com o objetivo de normatizar os processos e padronizar o recebimento de estudos e projetos.

O conteúdo disponibilizado é orientativo e visa subsidiar órgãos estaduais “contratantes” nos processos licitatórios, bem como as empresas prestadoras de serviços “contratadas” no desenvolvimento dos projetos rodoviários utilizando a metodologia BIM. Ressalta-se que o Caderno



foi elaborado com base na ABNT NBR ISO 19650-1 - Conceitos e Princípios, e está alinhado ao Decreto Estadual nº 10.086/2022 (PARANA, 2022a; PARANÁ, 2024).

Além disso, foram elaborados Termos de Referência e Editais para os processos de contratação de projetos, assegurando que os requisitos e critérios técnicos fossem atendidos pelos licitantes (DER/PR, 2024).

Três dimensões fundamentais da metodologia BIM

O processo de implantação do BIM no DER/PR baseia-se nos pilares fundamentais da metodologia BIM: **Tecnologia**, **Políticas** e **Processos** (SUCCAR, 2009), conforme demonstrado na Figura 2.

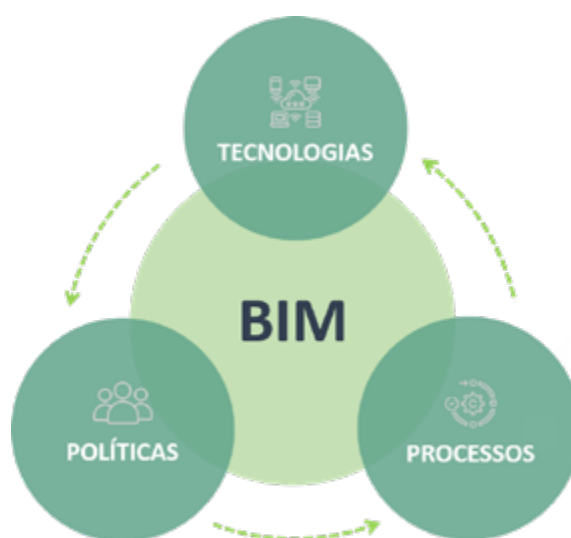


Figura 2. Fundamentos do BIM (Adaptado de SUCCAR, 2024).

A *tecnologia* abrange a infraestrutura necessária para a operação, incluindo programas, equipamentos, a conexão com a internet e a rede interna, segurança e armazenamento de arquivos, bem como o treinamento e aculturação adequado dos usuários no processo BIM. As escolhas devem ser baseadas nos prós e contras que cada decisão desencadeia. É crucial destacar o processo de transição, que envolve o treinamento da equipe de acordo com suas funções e participação no processo (SUCCAR, 2009; ABDI, 2017).

As *políticas* desempenham um papel fundamental na estratégia de implementação do BIM. Um dos enfoques principais do processo BIM são as pessoas. Nesse contexto, almeja-se promover uma abordagem colaborativa, onde técnicos e profissionais envolvidos discutam questões relativas ao projeto ou obra. Essa colaboração fornece as informações para a tomada de decisões mais assertivas e para a correção de possíveis problemas, aprimorando assim, o processo. É importante que os profissionais estejam capacitados e preparados para utilizar os recursos da melhor forma (SUCCAR, 2009; ABDI, 2017).

Os *processos* englobam tanto os procedimentos internos a serem adotados quanto os processos interempresariais. Isso inclui o plano de trabalho, que abrange o fluxo de trabalho, o cronograma, a especificação dos entregáveis, o método de comunicação, a definição de funções, o sistema de gestão de dados, arquivos e informações, o nível de detalhamento em cada fase e a especificação do uso do modelo em todos os ciclos de vida do projeto (SUCCAR, 2009; ABDI, 2017).



[DOI: 10.29327/1430212.49-72](https://doi.org/10.29327/1430212.49-72)

ADEQUAÇÃO DO PLANO DE IMPLANTAÇÃO BIM DO DER/PR EM DECORRÊNCIA DA NOVA LEI DE LICITAÇÕES E CONTRATOS ADMINISTRATIVOS

A implantação do BIM no DER/PR tem avançado significativamente para atender às exigências, tanto no âmbito federal quanto estadual. Esta jornada incluiu uma série de etapas essenciais, como treinamentos internos, testes práticos por meio de um projeto piloto, acordos de cooperação mútua com empresas e a disseminação da metodologia BIM dentro da organização. Toda essa implantação do BIM é também estruturada sob o foco na infraestrutura necessária para operação, nas pessoas e nos procedimentos operacionais. Essas ações garantem uma implantação bem-sucedida da metodologia BIM, refletindo na organização em buscar inovação, eficiência e qualidade no desenvolvimento e execução de projetos e obras de infraestrutura.

ADEQUAÇÃO DO PLANO DE IMPLANTAÇÃO BIM NO DER/PR

O Plano de Implantação BIM é o documento responsável por orientar o planejamento, procedimentos, ações e atividades voltadas para a implementação da metodologia BIM. Por ser um documento dinâmico, requer atualizações sempre que ocorrerem mudanças no planejamento do órgão.

Com a publicação do Decreto Estadual n.º 10.086/2022, foi necessário estruturar o processo de implantação, a fim de atender às exigências solicitadas em relação à obrigatoriedade na utilização do BIM nas contratações de serviços e obras de engenharia e arquitetura, obedecendo as fases para desenvolvimento de projetos, execução e fiscalização de obras, e operação e manutenção dos empreendimentos (PARANÁ, 2022b).

Além disso, a regulamentação possibilitou a utilização do regime de contratações integradas para as contratações que exigem tal metodologia (BRASIL, 2021). Assim, a partir de 2022, o DER/PR passou a adotar esse regime para a contratação dos projetos básico e executivo juntamente com a execução da obra.

A concorrência pioneira neste regime, sob os parâmetros da Lei de Licitações e Contratos Administrativos foi a licitação para a elaboração dos projetos básico e executivo e para a construção da Ponte de Guaratuba e seus acessos. Com a obrigatoriedade na utilização da metodologia BIM para o desenvolvimento dos projetos, o instrumento convocatório foi um marco nas contratações públicas do Estado, pois permitiu a contratação e execução de projetos e obras de infraestrutura rodoviária de forma eficiente, incentivou a inovação digital e permitiu a economia nos processos licitatórios (BRASIL, 2021).

Dessa forma, com as mudanças nos procedimentos e processos de contratação e a exigência de adoção gradual da metodologia BIM, o planejamento inicial precisou ser alterado. Assim, foram necessárias adequações e revisões tanto nas etapas de implantação da metodologia, no planejamento das tarefas e cronogramas, quanto na abordagem de aplicação das tarefas.

Alinhada às diretrizes estabelecidas pelo Governo Federal e Estadual, a abordagem da adequação do Plano de Implantação BIM do DER/PR prevê a implementação em 3 (três) etapas: Etapa 1 - Adoção (2019-2022); Etapa 2 (2023-2024); e Etapa 3 (após 2025) (Figura 3). Cada etapa baseia-se nos princípios fundamentais do BIM: tecnologias, políticas e processos, considerando a evolução e o planejamento futuro (SUCCAR, 2009; MDIC, 2018; BRASIL, 2024).



Leonardo da Silva Azevedo, Larissa Vieira, Débora dos Santos Alves,
Lucas Rattmann Vieira Theulen, Bruno Heimbecker Liberato,
André Luis Rehbein Boza & Silvana Bastos Stumm



Figura 3. Panorama da Implantação BIM DER/PR (AUTORES, 2024)

Etapa 1 – Adoção

A etapa inicial, denominada Adoção, engloba os primeiros anos da implantação do BIM no DER/PR, juntamente com o primeiro ano de vigência do Decreto Estadual n.º 10.086/2022. Iniciada em 2019, esta etapa concentrou-se em pesquisas, aculturação e capacitação das equipes técnicas do órgão. Além disso, enfatizou a definição de padrões e o investimento em novas tecnologias e ferramentas. A partir de 2022, esta etapa foi direcionada para a contratação e fiscalização de projetos com a previsão do uso da metodologia BIM (PARANÁ, 2022b).

Etapa 2

A etapa 2 abrange os anos de 2023 a 2024. Neste período, de acordo com Paraná (2022b), o foco do planejamento está na utilização dos modelos de informações e na adoção de tecnologias compatíveis com o BIM para execução e fiscalização das obras, além da contínua estruturação de dados e padronizações para o recebimento dos projetos.

Nesta etapa, o plano contempla a continuidade dos trabalhos de pesquisa, criação de padrões para apresentação dos projetos e a padronização das análises, bem como a capacitação contínua da equipe de fiscalização de projetos e obras. Além disso, o planejamento das ações prevê a atualização dos instrumentos convocatórios para contratação de projetos e obras rodoviárias, a fim de garantir a conformidade com os requisitos técnicos e normativos estabelecidos para o BIM.

Etapa 3

Com o foco nos anos após 2025, a etapa 3 visa expandir a implantação da metodologia para operação e manutenção dos empreendimentos pós-obra. Nesta etapa, será dada prioridade a gestão das informações de todos os ativos públicos por meio de um Ambiente Comum de Dados (ACD) único para o Estado do Paraná (PARANÁ, 2022b). Dessa forma, o planejamento das atividades busca promover o entendimento e o uso do ACD, uma plataforma centralizada para armazenamento, visualização, compartilhamento e colaboração de dados e informações relacionadas aos ativos públicos.



[DOI: 10.29327/1430212.49-72](https://doi.org/10.29327/1430212.49-72)

ADEQUAÇÃO DO PLANO DE IMPLANTAÇÃO BIM DO DER/PR EM DECORRÊNCIA DA NOVA LEI DE LICITAÇÕES E CONTRATOS ADMINISTRATIVOS

O planejamento prevê o estudo para monitoramento e gestão de ativos por meio do uso integrado de ACD e Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a fim de permitir a visualização, análise dos dados espaciais e integração das informações.

Com base nas experiências vivenciadas ao longo do ciclo de vida do empreendimento rodoviário, o Caderno BIM para contratação de projetos de infraestrutura rodoviária será atualizado, passando a incluir as diretrizes para contratação, fiscalização, gestão e operação de obras.

Adaptações nas atividades do Plano de Implantação BIM do DER/PR face à nova Lei de Licitações

Tendo em vista a abordagem da adequação do Processo de Implantação BIM no DER/PR em função da regulamentação da nova Lei de Licitações e Contratos Administrativos (BRASIL, 2021; PARANÁ, 2022b). Desta forma, é crucial entender as alterações que ocorrem em cada uma das três etapas. Organizadas de acordo com os princípios da metodologia BIM estudados por Succar (2009), são impactadas da seguinte maneira:

Tecnologias

- Investimentos em licenças para ferramentas de desenvolvimento, fiscalização, coordenação e gestão de projetos.
- Aquisição de novos equipamentos e tecnologias compatíveis com o BIM para execução e fiscalização de obras (como drones, *tablets* e *lasers*).
- Aquisição de computadores com capacidade para atender às demandas de operação e manutenção de ativos.

Políticas

- Capacitação da equipe técnica para fiscalização, medição e acompanhamento das obras.
- Reavaliação e programação de novos treinamentos para a equipe de apoio à fiscalização em relação às novas ferramentas.
- Estabelecimento de parcerias e cooperações para promover a integração da equipe técnica com soluções e tecnologias atualizadas.

Processos

- Adequação do Fluxo de Trabalho com a inclusão da Coordenadoria de Pesquisa e Desenvolvimento (CPD), setor atualmente responsável pela implantação de BIM no DER/PR, no início do processo licitatório, fornecendo informações para a elaboração do edital, acompanhamento e suporte necessário aos fiscais e contratadas.
- Atualização do Termo de Referência e dos instrumentos de contratação.
- Revisão dos padrões e procedimentos para análise e fiscalização de projetos e obras.



O Plano de Implantação BIM está sendo ajustado para incorporar todo o trabalho realizado até o momento, bem como para atender as diretrizes das Estratégias BIM Nacional e Estadual, juntamente com as exigências do Decreto Estadual n.º 10.086/2022. Para isso, o plano foi estruturado em capítulos que abordam as temáticas da Estrutura Organizacional do DER/PR, as Estratégias de Disseminação do BIM, as Etapas de Implantação e Planejamento, e o Monitoramento.



Figura 4. Estrutura do Plano de Implantação BIM do DER/PR (AUTORES, 2024)

O capítulo “Estrutura Organizacional” aborda a configuração do DER/PR, incluindo a composição de sua equipe técnica, a existência do GT InfraBIM e sua participação em grupos como o Grupo Técnico em BIM (GTEC BIM), vinculado à Estratégia BIM PR, responsável por impulsionar e apoiar a implantação e disseminação do BIM.

Em “Estratégias para disseminação do BIM” foram incluídas as referências legais e normativas que embasam a adoção do BIM no DER/PR, como as Estratégias BIM Nacional e Estadual, e os Decretos Federal n° 14.133 e Estadual n° 10.086.

As “Etapas da Implantação e Planejamento” apresentam a progressão da implantação, descrevendo as atividades realizadas e o planejamento das ações, que são organizadas em políticas, processos e tecnologias (SUCCAR, 2009). Neste capítulo, há um cronograma de atividades e uma estimativa de desembolso financeiro.

O “Monitoramento” descreve o acompanhamento e a avaliação da situação atual da implantação, com a exibição do diagnóstico da situação atual da implantação do BIM na organização e da matriz de risco.

A reorganização da estrutura dos capítulos do Plano de Implantação BIM do DER/PR tem como objetivo facilitar a compreensão do planejamento e guiar a disseminação da metodologia BIM para os demais setores que fazem parte do DER/PR, de maneira prática e comum.



[DOI: 10.29327/1430212.49-72](https://doi.org/10.29327/1430212.49-72)

ADEQUAÇÃO DO PLANO DE IMPLANTAÇÃO BIM DO DER/PR EM
DECORRÊNCIA DA NOVA LEI DE LICITAÇÕES E CONTRATOS ADMINISTRATIVOS

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de implantação da metodologia BIM no DER/PR representa não apenas um conjunto de procedimentos técnicos, mas sim uma mudança na forma como os projetos e obras de infraestrutura rodoviária são contratados, elaborados e executados.

Frente aos desafios trazidos pelas novas demandas legais e tecnológicas, é importante manter um compromisso contínuo com a inovação digital, a capacitação das equipes e a colaboração entre os diversos atores envolvidos.

Ao superar esses desafios, o DER/PR tem progredido na busca por uma gestão mais eficaz e transparente, o que reflete diretamente no modo como são concebidos e solicitados os projetos e obras de infraestrutura rodoviária no Estado do Paraná.

Desta forma, a pesquisa apresentou os motivos que culminaram na necessidade da adequação do processo de implantação e a organização das etapas da implantação em função da regulamentação da Lei de Licitações e Contratos Administrativos no âmbito do Paraná.

Neste sentido, é importante destacar que foi necessária uma abordagem ampla para a adequação do Plano de Implantação BIM do DER/PR, documento responsável por conduzir a efetiva implantação da metodologia, de modo que levou em consideração não somente os aspectos técnicos, mas também os organizacionais e humanos.

Portanto, é essencial reconhecer que o sucesso da implantação não se limita apenas à adoção de novas tecnologias, envolve um compromisso total com a mudança da cultura organizacional, uma visão estratégica de longo prazo e um investimento contínuo na formação e desenvolvimento das equipes.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL – ABDI. **Guia 1 – Processo de projeto BIM**. Brasília, DF: 2017

BRASIL. Decreto nº 11.888, de 22 de janeiro de 2024. Altera o Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019, que dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling no Brasil – Estratégia BIM BR e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Building Information Modelling – BIM BR. Brasília, DF: 2024.

BRASIL. Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019. Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação de Building Information Modelling e Institui o Comitê Gestor da Estratégia doo Building Information Modelling. Brasília, DF: 2019.

BRASIL. Lei nº 12.462, de 4 de agosto de 2011. Institui o Regime Diferenciado de Contratações Públicas - RDC. Brasília, DF: 2011.

BRASIL. Lei nº 14.133, de 1 de abril de 2021. Estabelece normas gerais de licitação e contratação para as Administrações Públicas diretas, autárquicas e fundacionais da União, dos Estados, do Distrito Federal e do Municípios. Brasília, DF: 2021.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO PARANÁ - DER/PR. **Normas e Custos Rodoviários**. Disponível em: <<https://www.der.pr.gov.br/Pagina/Normas-e-Custos-Rodoviaros>> Acesso em: 23 de abril de 2024.

EASTMAN, C. M. et al. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modelling for owners, managers, designers, engineers and contractors**. 1ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2008. p. 11-12.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS - MDIC: **Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling – BIM**. – Brasil, 2018.

PARANÁ - Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística; Departamento de Estradas de Rodagem. Caderno BIM: Caderno de especificações técnicas para contratação e projetos em BIM – Infraestrutura Rodoviária. Curitiba, PR, 2022a.112p.

PARANÁ. Decreto nº 10.086, de 17 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 14.133, Licitações e Contratos Administrativos. Curitiba, PR: 2022b.

PARANÁ. Decreto nº 12.862, de 20 de dezembro de 2022. Altera o Decreto nº 3.080, de 15 de outubro de 2019, que institui a Estratégia Estadual de Fomento e Implantação do Building Information Modelling – BIM. Curitiba, PR: 2022c.

PARANÁ. Decreto nº 3.080, de 15 de outubro de 2019. Institui a Estratégia Estadual de Fomento e Implantação do Building Information Modelling. Curitiba, PR: 2019.

PARANÁ. **PORTAL BIM PR**. Estratégia BIM Paraná. Disponível em: <<https://www.bim.pr.gov.br/Pagina/Estrategia-BIM-PR>>. Acesso em: dia 25 de abril de 2024.

SUCCAR, Bilal. **Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders**. *Automation in construction*, v. 18, n. 3, p. 357- 375, 2009.



FLUXO DE TRABALHO PARA ORÇAMENTAÇÃO EM BIM DE OBRAS RODOVIÁRIAS

*Paulo Alberto Sampaio Santos¹; Matheus Lima de Barros¹; Melissa Midori Yamada²
& José Vinícius Silva Martins³*

RESUMO

O processo de quantificação e orçamentação de projetos de engenharia pode ser otimizado com a adoção da Modelagem da Informação da Construção (BIM). Obras rodoviárias são constituídas de diversas disciplinas, onde a extração das quantidades do modelo de forma automatizada facilita a elaboração de orçamentos. Esta pesquisa busca desenvolver um fluxo de trabalho para quantificação e orçamentação em BIM com o mapeamento das informações necessárias para pavimentação e terraplenagem. Dessa forma, foi proposto um fluxo de trabalho com as etapas: i) definição dos requisitos para orçamento; ii) modelagem do estudo de caso; iii) extração de quantidades; iv) elaboração do orçamento em BIM. A modelagem do estudo de caso foi realizada no Autodesk Civil 3D com a configuração personalizada de conjuntos de propriedades. Os quantitativos de terraplenagem foram extraídos do modelo como relatórios por seção. O serviço de limpeza do terreno foi quantificado com o deslocamento da superfície existente. As distâncias de transporte foram estimadas com base em jazidas próximas da obra. As camadas de pavimentação foram quantificadas pelo Civil 3D conforme os códigos das camadas. Os dados foram importados na plataforma OrçaFascio, o que possibilitou o mapeamento das informações necessárias do modelo. Foram notadas dificuldades na avaliação da acurácia geométrica dos modelos e na extração automática de quantitativos, o que exige padronização de dados. Os resultados obtidos evidenciam a importância da definição de requisitos, de forma que o modelo seja elaborado atendendo os padrões e os formatos das ferramentas de orçamentação. Recomenda-se a modelagem em outras soluções do mercado, além da adoção de formatos abertos e de rotinas para tornar o processo mais dinâmico.

PALAVRAS-CHAVE: Quantificação, Orçamento; Modelagem da Informação da Construção (BIM).

ABSTRACT

The process of quantifying and cost estimating in engineering projects can be optimized by adopting Building Information Modeling (BIM). Road construction projects encompass various disciplines, where automated extraction of quantities from the model facilitates cost estimation. This research aims to develop a workflow for quantification and cost estimation in BIM by mapping the necessary information for paving and earthworks. Thus, a workflow was proposed with the following stages: i) definition of the cost estimation requirements; ii) modeling the case study; iii) quantity take-off process; iv) BIM cost estimation. The case study modeling was conducted in Autodesk Civil 3D with customized property set configurations. The earthworks quantities were extracted from the model as reports by section. The land clearing service was quantified using the displacement of the existing surface. Transportation distances were estimated based on quarries close to the site. The paving layers were quantified by Civil 3D according to the cross-section shape codes. The data was imported into the OrçaFascio platform, which enabled the necessary information to be mapped onto the model. Difficulties were noted in assessing the geometric accuracy of the models and in the automatic extraction of quantities, which requires data standardization. The results obtained highlight the importance of defining requirements so that the model is prepared in accordance with the standards and formats of cost estimating tools. Modeling in other market solutions is recommended, as well as the adoption of open formats and routines to make the process more dynamic.

KEY WORDS: Quantity TakeOff, Cost Estimation; Building Information Modeling (BIM).

¹ Universidade de Brasília, e-mail: pauloengcsantos@gmail.com; matheuslb.eng@gmail.com

² TPF Engenharia, e-mail: melissa.vamada@tpfe.com.br

³ Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, e-mail: contato.jvsmartins@gmail.com



INTRODUÇÃO

O setor de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) está em processo acelerado de transformação no contexto da Indústria 4.0. Estas mudanças são impulsionadas pela adoção da Modelagem da Informação da Construção ou *Building Information Modelling* (BIM), abordagem colaborativa para gestão da informação de projetos e obras.

No ciclo de vida do empreendimento, a fase de quantificação para elaboração de orçamentos é uma tarefa complexa com desafios e obstáculos, além de ser ponto decisivo para um bom planejamento da obra. Em um fluxo de trabalho tradicional, cabe ao profissional orçamentista a determinação dos serviços a serem orçados e as quantidades necessárias a serem extraídas do projeto. A falta de comunicação e de padronização nas entregas das informações dificulta esse processo, o que é evidenciado pela quantidade de retrabalhos e tarefas manuais.

Nesse sentido, um fluxo de trabalho BIM pode trazer benefícios para a elaboração de orçamentos com a definição clara de requisitos de entregas, comunicação efetiva entre equipes e extrações automatizadas de quantidades. A utilização de uma ferramenta BIM permite a configuração de parâmetros de objetos e suas dimensões, de modo que relatórios e planilhas de quantidades podem ser extraídos diretamente dos modelos digitais gerados.

Obras rodoviárias são constituídas de diversas disciplinas, e a que representa, de modo geral, um dos maiores custos de execução, é o item de camadas de pavimentação e de terraplenagem. A obtenção e a atualização dos quantitativos com o uso do BIM possibilita uma estimativa de custos mais precisa, com a identificação antecipada de itens mais relevantes.

Esta pesquisa busca desenvolver um fluxo de trabalho para quantificação e orçamentação em BIM com ênfase nas disciplinas de pavimentação e terraplenagem. Para isso, foram estabelecidos os níveis de informação dos elementos a serem modelados e a validação por meio de um estudo de caso, de forma a responder as seguintes perguntas de pesquisa:

- Como as ferramentas BIM podem facilitar a extração de quantidades no caso investigado?
- Quais são as informações necessárias para permitir a automatização destas quantidades que devem ser especificadas além daquelas extraídas diretamente do modelo?

BIM APLICADO A INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA

Segundo o Decreto Federal nº 11.888 de 22 de janeiro de 2024, BIM pode ser entendido como o conjunto integrado de processos e tecnologias que possibilita a criação, a utilização, a atualização e o compartilhamento de modelos digitais de construções de maneira colaborativa. Os agentes envolvidos com o empreendimento podem colaborar com as informações do modelo em ambientes de nuvem, potencializando a comunicação ao longo do ciclo de vida (BRASIL, 2024).

No contexto brasileiro, iniciativas para disseminação do BIM para infraestrutura rodoviária foram realizadas por entidades da administração pública com destaque para o Caderno de Requisitos Técnicos BIM do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes e o Caderno BIM do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DNIT, 2024; DER/PR, 2023).

Esses materiais foram elaborados com base na série de normas ABNT NBR ISO 19650, no qual apresentam recomendações para a gestão de informação com o uso do BIM no ciclo de vida de empreendimentos de qualquer natureza. Em ambos os casos, considera-se a definição de requisitos de informação, estudo dos fluxos de trabalho BIM e a construção de um Plano de Execução BIM



[DOI: 10.29327/1430212.49-73](https://doi.org/10.29327/1430212.49-73)

FLUXO DE TRABALHO PARA ORÇAMENTAÇÃO EM BIM DE OBRAS RODOVIÁRIAS

(BEP), de modo a nortear o planejamento, o desenvolvimento e o acompanhamento dos trabalhos. Nesse sentido, ressalta-se a importância da definição dos usos pretendidos para os modelos.

De acordo com o *BIM Project Execution Planning Guide* versão 3, um dos usos de modelos na abordagem BIM é a estimativa de custos (MESSNER *et al.*, 2021). Os benefícios citados pelos autores do uso BIM de estimativa de custos são diversos, incluindo a facilidade de extração de quantitativos, avaliação de custos comparativos de alternativas, e principalmente, uma vez que esse processo esteja automatizado, trazer os orçamentistas para as atividades que agregam mais valor, como a discussão de metodologias de construção e de análises de risco.

ORÇAMENTAÇÃO DE OBRAS DE INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA

A elaboração de orçamentos envolve atividades como a extração de quantitativos, definições de equipamentos, materiais e mão-de-obra e a identificação de serviços adequados ao contexto do projeto. Para obras de infraestrutura rodoviária no Brasil, comumente adota-se o Sistema de Custos de Obras Rodoviárias (SICRO) do DNIT. A base do SICRO é amplamente utilizada devido às atualizações constantes para considerar a evolução tecnológica de equipamentos e de soluções de engenharia. O aprimoramento contínuo e as pesquisas de preço nas Unidades Federativas contribuem para uma maior confiabilidade dos orçamentos (DNIT, 2017).

Na aplicação do BIM para estimativa de custos em obras de infraestrutura, destacam-se experiências prévias que atestam a falta de padronização e de informações necessárias nos modelos. Dessa forma, a definição de requisitos de informação e do Nível de Informação Necessária (LOIN) dos elementos são evidenciadas para se evitar orçamentos inapropriados (ABNT, 2022). Ainda, existem as dificuldades na exportação de objetos de infraestrutura em formatos abertos, como o *Industry Foundation Classes* (IFC). Limitação essa observada em ferramentas de modelagem a partir de análises consistência de informações dos modelos (BELCHER; ABRAHAM, 2023).

ETAPAS METODOLÓGICAS

As etapas metodológicas que orientaram o desenvolvimento do trabalho serão descritas nos tópicos a seguir.

i) Definição dos Requisitos para Orçamento

Os requisitos para os elementos das disciplinas de pavimentação e terraplenagem foram definidos conforme as orientações dos cadernos técnicos do SICRO, no qual detalham a metodologia executiva, produção horária, mão de obra, materiais e critérios de medição para cada composição de custo (DNIT, 2024). Movimentações de terra e camadas típicas de pavimentos flexíveis foram especificadas de forma a orientar a elaboração e inserção de informações em modelos tridimensionais, conforme as etapas subsequentes.

ii) Modelagem BIM do Estudo de Caso

Para validação dos requisitos definidos para os elementos, foi proposta a modelagem BIM de um estudo de caso hipotético de um retorno em desnível na PR-182, próximo a Realeza, Paraná (MARTINS; SANTOS; BARROS, 2024).



Pela facilidade ao acesso de licenças e material de suporte, o software adotado para a modelagem foi o Autodesk Civil 3D com objetos do tipo corredor. A plataforma OrçaFascio foi escolhida para orçamentação, devido a integração automatizada com modelos BIM, proporcionando precisão, visualização 3D e colaboração aprimorada entre o Civil 3D. A ferramenta ArcGIS Pro também foi empregada para os estudos de distâncias de transportes de jazidas e bota-foras na região do estudo de caso.

O modelo está apresentado na Figura 1, com vistas gerais do retorno em desnível e detalhes das disciplinas. Os procedimentos adotados para modelagem podem ser consultados em Martins; Santos e Barros (2024).

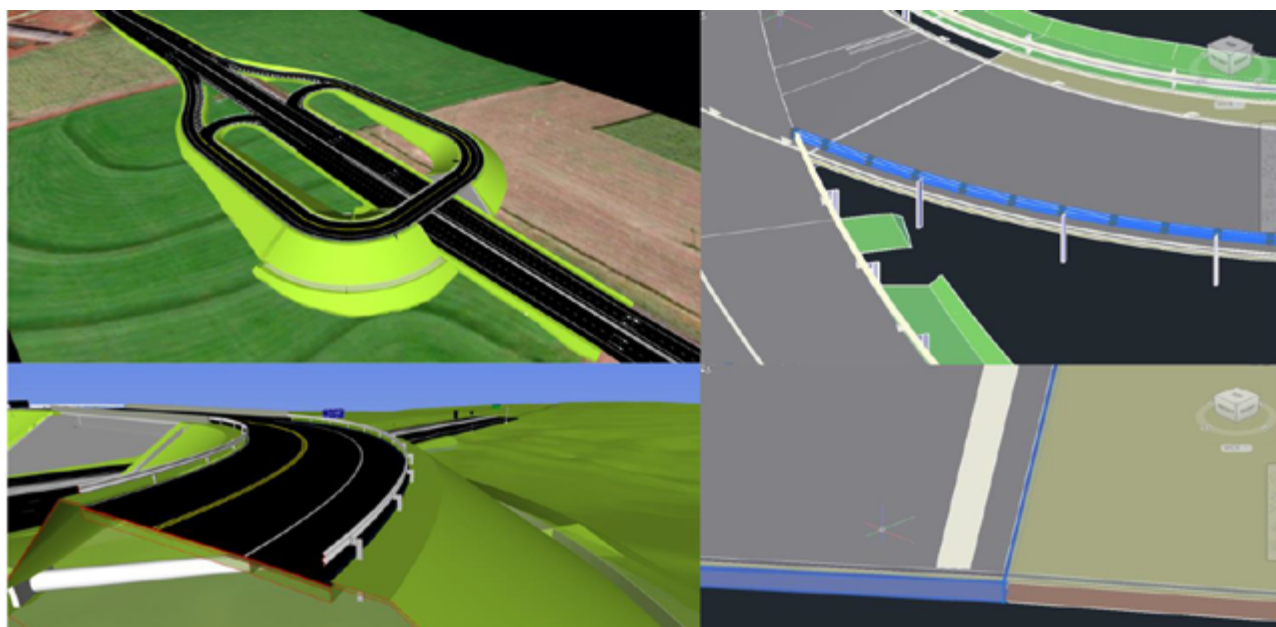


Figura 1. Modelo BIM do Estudo de Caso. (Martins; Santos; Barros, 2024)

iii) Processo de Extração de Quantidades

A integração do *software* Civil 3D com a plataforma OrçaFascio para a extração de quantidades do modelo foi realizada pela geração de relatórios em formato .xml com a função *Compute Materials*. A manipulação de arquivos nativos .dwg também foi empregada, visto que podem conter informações não geométricas, como materiais de construção e planejamento pré-definido para cada atividade, conforme os itens do SICRO.

A configuração personalizada de conjuntos de propriedades (*Property Sets*) no Civil 3D foi utilizada para a inclusão precisa de propriedades e parâmetros em elementos do modelo. Com isso, garante-se que todos os dados relevantes sejam considerados e gerados conforme as necessidades específicas do projeto. O IFC 4x3, aprovado como o padrão a ser utilizado, pela *buildingSMART*, foi publicado na atualização da ISO 16739-1:2024. O IFC 4x3 seria uma alternativa aos conjuntos de propriedades do Civil 3D, de forma a facilitar o compartilhamento das informações para orçamentação do modelo em outras ferramentas.

DOI: [10.29327/1430212.49-73](https://doi.org/10.29327/1430212.49-73)

FLUXO DE TRABALHO PARA ORÇAMENTAÇÃO EM BIM DE OBRAS RODOVIÁRIAS

O IFC 4x3 é uma novidade recente, onde cabe destacar que no momento da elaboração desse trabalho, o *software* escolhido para a elaboração do orçamento não reconhece as informações contidas nessa versão de IFC. Além disso, em versões anteriores, como IFC 2.3 e o IFC 4, o mapeamento poderia ser insuficiente para a documentação das propriedades de filtros ou a própria entidade de modelo, por não abrangerem amplamente as disciplinas de infraestrutura. Considerando que o Civil 3D permite a integração com a maioria dos *softwares* de orçamentação disponíveis no mercado, optou-se por continuar a pesquisa com esta ferramenta.

iv) Elaboração do Orçamento em BIM

A base de custos adotada no trabalho foi o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO). A utilização do SICRO em orçamentos para obras públicas de infraestrutura, está embasada na legislação federal Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021, que estabelece normas gerais para contratações em obras financiadas com recursos públicos federais.

A plataforma escolhida para orçamento, OrçaFascio, oferece facilidade de uso para o SICRO. A plataforma possibilita o compartilhamento dos cálculos e análises detalhadas de projetos do Civil 3D, de forma automatizada. A leitura das extrações de quantidades do Civil 3D nos formatos .xml e .dwg alimenta a geração de relatórios de orçamento de forma eficiente.

Dessa maneira, os custos foram atribuídos com a atualização dinâmica dos cálculos, com base em regras de filtragem. A partir do processo, as informações necessárias dos elementos (LOIN) foram mapeadas a partir das informações necessárias solicitadas pelo *software* OrçaFascio, de modo a atender os critérios de orçamento que eram lidos nos elementos. Para cada grupo de serviço, identificou-se que a ferramenta necessitava de formatos diferentes. Para serviços relacionados às camadas de pavimento e alinhamento do eixo da rodovia, o OrçaFascio conseguia reconhecer diretamente a informação presente nos elementos modelados do Civil 3D. Para serviços de corte e aterro foi necessária a criação de um relatório personalizado, a partir de linguagem de marcação .xml na ferramenta Civil 3D, com uma forma de indexação hierárquica de informações e composições de de atributos por texto. Na Tabela 1 indicam-se os formatos de relatório para os grupos de elementos considerados.

Tabela 1. Formato necessário para cada Grupo de Elementos.

Grupo de Elementos	Formato de arquivo necessário
Serviços relacionados às camadas de pavimento do corredor e aos dados do alinhamento do eixo da rodovia	.dwg
Serviços de corte e aterro	.xml

RESULTADOS E DISCUSSÃO

i) Requisitos dos Elementos do Modelo BIM

Por meio da Tabela 2, sugere-se a aplicação do LOIN indicado pela ABNT NBR ISO 19650: Parte 1 para facilitar o processo de orçamentação automatizado em todas as fases do projeto e casos de uso



BIM. A tabela detalha o resultado das informações necessárias para a orçamentação em projetos de construção de rodovias no fluxo de trabalho proposto de modelagem.

A partir dos cadernos técnicos do SICRO, foram estabelecidos os requisitos de informação para elementos típicos das disciplinas de terraplenagem e pavimentação. A tabela também especifica os requisitos estruturados do Civil 3D para importação na plataforma de orçamento OrçaFascio. Os formatos das informações também foram especificados, para facilitar a integração entre as ferramentas em futuras aplicações.

A análise das metodologias executivas e critérios de medição dos cadernos técnicos do SICRO apontaram especificações necessárias não modeladas, como grau de compactação e tipos de materiais. O processo de extração de quantidades facilita a obtenção de comprimentos, áreas e volumes dos elementos tridimensionais. Para as especificações não modeladas, enfatiza-se a importância da sua definição para a precisão do orçamento realizado, nos quais podem ser enviadas em arquivos externos ao modelo ou diretamente em propriedades customizadas dos elementos.

Tabela 2. Especificação do mapeamento de informações para orçamentação BIM em obras rodoviárias.

Descrição do serviço	Unid.	Requisitos de Informação no fluxo Autodesk Civil 3D e OrçaFascio (Adaptada de DNIT, 2024)	Atividades a serem desenvolvidas	Formato
Desmatamento, Destocamento, Limpeza de Áreas e Estocagem	m ²	Recorte da superfície, delimitada pela faixa de domínio	Criação de superfície representativa	.dwg
Bota-fora de material de camada vegetal	m ³	Recorte da superfície, especificando espessura de rebaixo e delimitada pela faixa de domínio	Criação de superfície representativa Advindo de Dados SIG Necessária criação de automatização de relatórios no <i>software</i>	.xml
Escavação e Carga	m ³	Classificação de Solo, por informações SIG ou entradas de dados geológicos-geotécnicos. Criação de superfícies em camadas classificadas, com a extensão <i>Geotechnical Modeler</i> Relatório de quantidades (QTO)	Criação de superfície representativa; Necessária criação de automatização de relatórios no <i>software</i>	.xml
Transporte de materiais	t.km	Inclusão de informações SIG no modelo	Advindo de dados SIG de locação de jazidas	.dwg
Sub-leito	m ³	Configuração da camada de pavimento pelo <i>subassembly</i> Informar grau de compactação	Criação de superfície representativa; Necessária criação de automatização de relatórios no <i>software</i>	.dwg
Sub-base	m ³	Configuração da camada de pavimento pelo <i>subassembly</i> Informar grau de compactação		.xml
Base		Necessário informar o material de mistura, para distribuição das tensões verticais do pavimento Inclusão de informações SIG no modelo		.xml



DOI: 10.29327/1430212.49-73

FLUXO DE TRABALHO PARA ORÇAMENTAÇÃO EM BIM DE OBRAS RODOVIÁRIAS

Descrição do serviço	Unid.	Requisitos de Informação no fluxo Autodesk Civil 3D e OrçaFascio (Adaptada de DNIT, 2024)	Atividades a serem desenvolvidas	Formato
Transporte de Carga	km	Inclusão de informações SIG de Jazida no modelo	Criação de <i>Corridor</i> representativo para atribuição de relatórios de corte e aterro	.xml
Imprimação	m ²	Configuração da camada de pavimento pelo <i>subassembly</i> Especificar imprimante	Criação de <i>Corridor</i> Representativo para atribuição de <i>Code Sets</i> nos elementos; Necessária criação de propriedades adicionais;	.dwg
Pintura de ligação	m ²	Configuração da camada de pavimento pelo <i>subassembly</i> Especificar ligante asfáltico		.dwg
Cimento Asfáltico de Petróleo	m ³	Cálculo de volume a partir do <i>subassembly</i> do revestimento	Criação de <i>Corridor</i> Representativo para atribuição de <i>Code Sets</i> nos elementos; Necessária criação de propriedades adicionais;	.dwg
Revestimento asfáltico	m ³	Configuração da camada de pavimento pelo <i>subassembly</i>		.dwg
Tratamento Superficial (Simples, Duplo e Triplo)	m ³	Taxa de agregado	Criação de <i>Corridor</i> Representativo para atribuição de <i>Code Sets</i> nos elementos; Necessária criação de propriedades adicionais;	.dwg
Lama Asfáltica, Micro-revestimento a Frio e Pré-Misturado a Frio	m ³	Informar Faixa Granulométrica Informar taxa de cal hidratada Especificar agregado Informar taxa de agregado		.dwg

Nos itens a seguir, serão descritas a extrações de quantitativos dos serviços realizadas conforme a Tabela 2, de modo a elucidar facilidades e limitações observadas no fluxo de trabalho proposto.

ii) Extração de Serviços de Terraplenagem

Os resultados dos serviços de terraplenagem foram obtidos de relatório personalizado, a partir de linguagem de marcação .xml, na ferramenta Civil 3D. Na Figura 2 apresentam-se os relatórios gerados de forma automatizada com a função *Compute Materials* do Civil 3D.

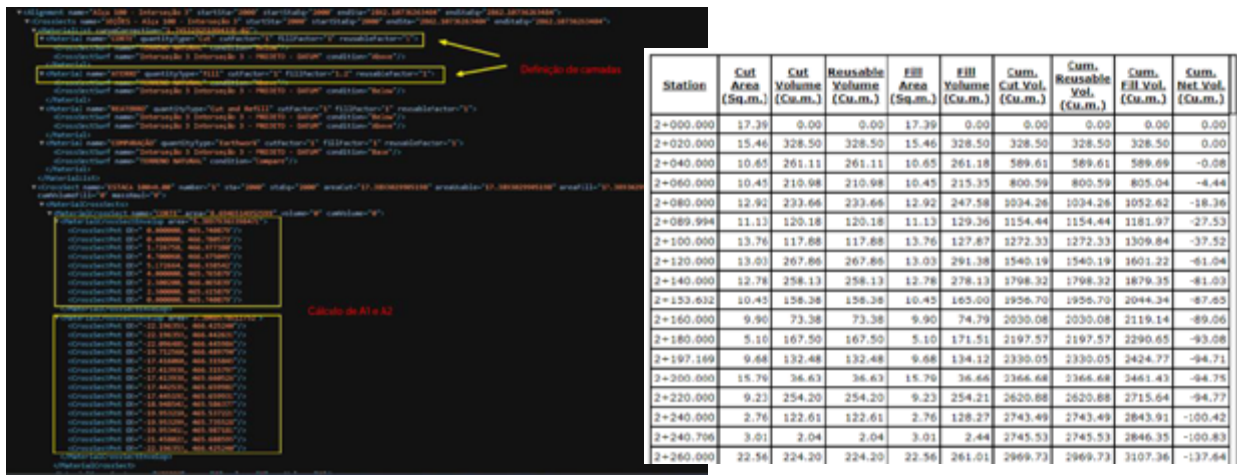


Figura 2. Relatório de Corte e Aterro exportado do Autodesk Civil 3D.



Essa ferramenta cria uma lista de materiais com superfícies e áreas de seções para calcular volumes. É necessário mapear os materiais a partir da propriedade *Alignment Name*, as camadas de superfícies e camadas do corredor.

O relatório de quantidades no formato XML foi importado na plataforma OrçaFascio. Para as demais camadas de pavimento, todos os relatórios gerados a partir da função *Compute Materials* seguiram a separação por alinhamento. Portanto, listas de materiais separadas foram criadas para o eixo da rodovia, o viaduto e as abas de ligação.

No Civil 3D, o método da área média final calcula volumes entre estacas somando as áreas de material nas estacas adjacentes, dividindo por dois para obter a média das áreas, e multiplicando pelo comprimento entre as estacas (L). O processo analítico do cálculo das áreas das seções transversais, bem como o posterior relatório de cubação dos volumes, é base de cálculo para a padronização de projetos rodoviários de contratações federais, e são especificados em De Cerqueira (1985). Esse cálculo é repetido para todas as estacas ao longo do projeto para calcular o volume total e pode ser resumido pela Equação (1) a seguir:

$$V = \frac{L}{2}[A_1 + A_2] \quad (1)$$

Sendo:

V = Volume [m^3];

L = Distância entre estacas [m];

A = Área da seção transversal [m^2].

iii) Serviços de Desmatamento, Destocamento, Limpeza de Áreas e Estocagem

A superfície de limpeza superficial foi criada com a ferramenta *Raise/Lower Surface* ao inserir um valor negativo de 30 cm para a camada de escavação. Isso gerou uma cópia da superfície existente do terreno, representando a espessura necessária para quantificação do serviço. Esta espessura de camada adicional está representada na Figura 3, a partir da extração de um perfil vertical de elevação do terreno.

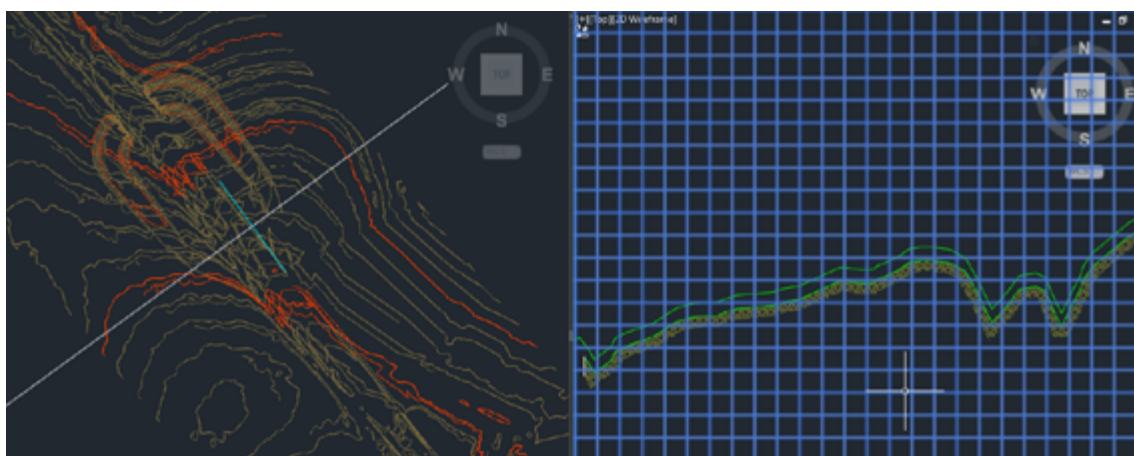


Figura 3. Sobreposição do recorte da superfície de Limpeza Superficial e o Perfil Vertical.



DOI: [10.29327/1430212.49-73](https://doi.org/10.29327/1430212.49-73)

FLUXO DE TRABALHO PARA ORÇAMENTAÇÃO EM BIM DE OBRAS RODOVIÁRIAS

iv) Serviços de Transportes de Carga

No caso dos serviços de terraplenagem, o estudo da compensação de terra entre cortes e aterros deve ser considerado na orçamentação. Essa etapa está relacionada com o conhecimento técnico do projetista e geralmente não é automatizada. As composições de custos do transporte são determinadas pelo tipo de equipamento e pelas condições do pavimento, como rodovias pavimentadas, revestimentos primários e leito natural. Despesas operacionais, como pedágios e tempo de viagem, também devem ser considerados.

A avaliação das distâncias de transportes de materiais pode ser realizada e simulada por meio de dados do Sistema de Informação Geográfica de Mineração (SIGMINE), no qual possibilita adicionar áreas de jazidas e de exploração de minérios próximas à obra de forma georreferenciada em SIG (Sistema de Informação Geográfica, ou do inglês, GIS), o que facilita o cálculo da logística de transporte (ANM, 2024). Na Figura 4 apresentam-se todas as jazidas locais próximas ao local da obra do estudo de caso e que serviram de ajuda para o orçamento na ferramenta ArcGIS Pro utilizada no fluxo de trabalho proposto.



Figura 4. Localização de jazidas para transporte de cargas no ArcGIS Pro.

v) Serviços de Camadas de Suporte do Pavimento e Revestimento Asfáltico

O modelo de corredor no Civil 3D é representado por seções transversais de rodovias em estacas predeterminadas, com linhas longitudinais conectando pontos entre camadas, denominadas *Code Shapes*. Esses códigos são parte integrante da definição de *assemblies* (montagens) e *subassemblies* (submontagens) de elementos no Civil 3D, que são usados para criar modelos detalhados e precisos de corredores, a partir de um alinhamento. De um modo geral, esta forma de denominação define a informação dos materiais utilizados nas camadas da seção em modelos de corredores e, portanto, são a partida inicial para permitir o compartilhamento de dados.



Para a automação da extração de quantitativos, torna-se necessário definir os *Code Shapes*, e atribuí-las a um estilo de conjunto de informações, que na Figura 5 são representados por rótulos numérico. Para o estudo de caso, a seção-tipo e parte das informações necessárias estão representadas no esquema da Figura 5.

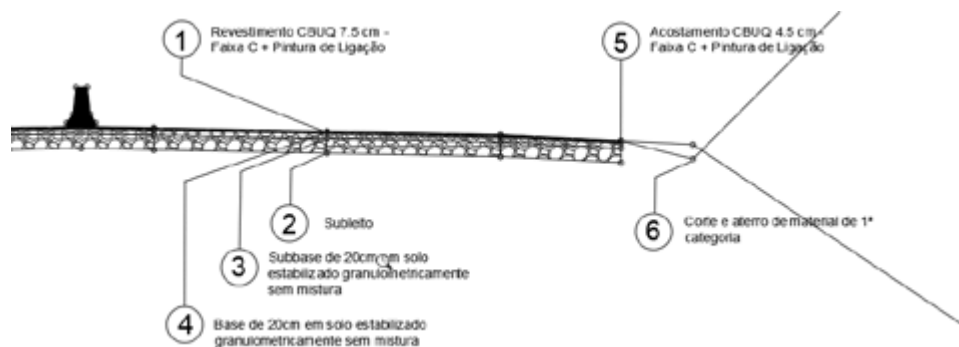


Figura 5. Seção tipo do estudo de caso.

Ao atribuir *Code Shapes* em *assemblies* e *subassemblies*, o *software* entende que estas ligações de informação estão relacionadas aos elementos de projeto, e, portanto, possibilita calcular volumes dos materiais necessários para orçamentação. Como resultado, o OrçaFascio conseguiu reconhecer de forma automatizada todas as informações referentes ao alinhamento, sejam elas de todas as camadas do pavimento, modelados do Civil 3D.

vi) Processo de Orçamentação

Ao escolher as estacas de cálculo de cada serviço, a plataforma OrçaFascio lê as informações do arquivo dwg e calcula automaticamente o volume do quantitativo adequado. Para movimentações de terra, não foi necessário adicionar empolamento, pois este coeficiente já estava incluso previamente nas configurações de parâmetro de terraplenagem do Civil 3D. Desta forma, todo cálculo de volume que o Civil 3D compartilhar, já é incluso o empolamento. Na Figura 6 apresentam-se os resultados da extração automatizada dos volumes de terraplenagem, a partir das janelas de diálogo do *software*.

UND	QUANT.	VALOR UNIT	VALOR COM BDI	TOTAL
	1,00		14.457,25	14.457,25
/2020 m³	3.517,5812571	4,11	14.457,25	14.457,25
Total sem BDI				R\$ 14.457,25
Total do BDI				R\$ 0,00
TOTAL				R\$ 14.457,25

Figura 6. Fluxo de quantificação automatizada no OrçaFascio.



DOI: [10.29327/1430212.49-73](https://doi.org/10.29327/1430212.49-73)

FLUXO DE TRABALHO PARA ORÇAMENTAÇÃO EM BIM DE OBRAS RODOVIÁRIAS

O reconhecimento automático das informações de quantidades foi um desafio identificado no processo de orçamentação. Não foi possível avaliar a acurácia geométrica dos modelos quantificados, o que pode afetar os custos de cada serviço. As informações referentes ao volume de terraplenagem são atribuídas automaticamente pelo Civil 3D, calculados a partir da Equação 1. No Civil 3D, você pode configurar parâmetros específicos para a terraplenagem, como inclinações máximas e mínimas, cortes e aterros máximos, e estes dados servem de atribuição para o cálculo automatizado dos volumes. Porém, em modelos BIM, é necessária uma verificação da precisão da modelagem, a partir de ferramentas de detecção de potenciais conflitos ou interferências entre elementos de um projeto, processo denominado *clash detection*.

Além da precisão geométrica, é importante discutir a extensão detalhada das informações, tanto aquelas relacionadas à geometria quanto às não geométricas, ao longo das fases de projeto. mapeamento das propriedades pode não ser eficaz nas fases iniciais devido à necessidade de filtros de informações na plataforma OrçaFascio, os quais possivelmente não foram criados ou não há detalhamento suficiente para os serviços correspondentes. Por exemplo, nas fases iniciais do projeto, basta conhecer os comprimentos de eixos rodoviários, pontes e túneis. No projeto detalhado, por sua vez, é necessário considerar diversas unidades de medida e propriedades dos materiais e dimensões.

CONCLUSÃO

O estudo de orçamentação de obra rodoviária destaca áreas para melhorar a definição de requisitos de informação da norma ABNT NBR ISO 19650. A análise das metodologias do SICRO identificou a necessidade de especificar detalhes não modelados, como grau de compactação e tipos de materiais, fundamentais para a precisão do orçamento. Dessa forma, a etapa de definição de requisitos e como seriam mapeados no fluxo BIM se demonstrou mais trabalhosa e minuciosa no processo de orçamentação apresentado. Este fator destaca ainda mais a importância da especificação precisa das informações não geométricas em conformidade com o LOIN do projeto.

A extração de quantidades a partir do LOIN facilitou a medição de elementos tridimensionais, possibilitando o envio dessas especificações em arquivos externos (como .xml) ou a integração às propriedades dos elementos (em formato .dwg). O estudo identificou desafios na extração automática de quantidades, não sendo possível verificar se os cálculos de volumes de terraplenagem foram precisos em relação aos dados extraídos pelo *software*, sugerindo a necessidade de pesquisas futuras para aprimorar essa avaliação.

Os requisitos apresentados podem não ser adequados nas fases iniciais do projeto devido à falta de filtros específicos na plataforma de orçamentação, todavia, no projeto detalhado, são necessários diversos dados, como unidades de medida, propriedades dos materiais e dimensões. Dessa forma, a contribuição desta pesquisa com as informações necessárias para orçamentação ajuda a mitigar dificuldades e retrabalhos no caso das disciplinas de pavimentação e terraplenagem.

Como sugestão para futuras pesquisas, seria interessante avaliar outras soluções de modelagem como o OpenRoads (Bentley), o Istram (Buhodra) e o Roads (Sierrasoft) utilizando o mesmo fluxo e as especificações da Tabela 2. Isso permitiria analisar a efetividade de outras ferramentas de mercado e do fluxo de mapeamento das informações proposto nesta pesquisa. Além disso, a interoperabilidade entre projetistas pode ser facilitada por formatos OpenBIM, como o IFC. A adoção de formatos abertos incentiva o desenvolvimento de ferramentas não proprietárias, melhorando a precisão e automação do orçamento em BIM.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 19650-1: Organização da informação acerca de trabalhos da construção – Gestão da informação usando a modelagem da informação da construção. Parte 1: Conceitos e princípios. Rio de Janeiro, 2022.

ANM, Agência Nacional de Mineração. SIGMINE – Sistema de Informação Geográfica da Mineração. Disponível em: <https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908>. Acesso em maio de 2024.

BELCHER, Ethan J.; ABRAHAM, Yewande S. Lifecycle Applications of Building Information Modeling for Transportation Infrastructure Projects. Buildings, v. 13, n. 9, p. 2300, 2023.

BRASIL. Decreto Federal Nº 11.888, de 22 de janeiro de 2024. Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modeling no Brasil - Estratégia BIM BR e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Building Information Modeling - BIM BR. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2024.

DE CERQUEIRA, Francisco Carvalho. Programa para o cálculo de volumes de terraplenagem dos projetos de estradas. Revista Tecnologia, v. 6, n. 1, 1985.

DER, Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. Plano de Execução BIM do DER/PR. Curitiba, 2023.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Cadernos Técnicos do SICRO. Coordenação-Geral de Custos de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Brasília, 2024.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes. Volume 01: Metodologia e Conceitos. Coordenação-Geral de Custos de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Brasília, 2017.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. CRTBIM: Caderno de Requisitos Técnicos BIM do DNIT. Versão 1.0. Núcleo BIM. Departamento de Planejamento e Pesquisa. Brasília, 2024.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. VGeo – Visualizador de Dados do DNITGeo. Disponível em: <https://servicos.dnit.gov.br/vgeo/>. Acesso em maio de 2024.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produtos de Geociências. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/todos-os-produtos-geociencias.html>. Acesso em maio de 2024.

INCRA, Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. SIGEF – Sistema de Gestão Fundiária. Disponível em: <https://sigef.incra.gov.br/>. Acesso em maio de 2024.

ISO, International Organization for Standardization. ISO 16739-1: Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Part 1: Data schema. 2024.

MARTINS, José Vinícius Silva; SANTOS, Paulo Alberto Sampaio; BARROS, Matheus Lima de. Gerenciamento e Planejamento de Projetos de Infraestrutura Rodoviária em BIM com o foco na gestão de produção e interação de ativos. 5º Congresso Português de Building Information Modeling – PTBIM. Lisboa, 2024.

MESSNER, John; ANUMBA, Chimay; DUBLER, Craig; GOODMAN, Shane; KASPRZAK, Colleen; KREIDER, Ralph; LEICHT, Robert; SALUJA, Chitwan; ZIKIC, Nevena; and BHAWANI, Sagata, BIM Project Execution Planning Guide, version 3.0, University Park, PA, USA, 2021.



INDICADORES DE DESEMPENHO COMO FERRAMENTA DE SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO PARA A GERÊNCIA DE ESTRUTURAS NO ÂMBITO DO DNIT

Paulo Fernando Matos de Santana¹; Sarah da Silva Brito¹; Wallas Borges Araújo¹; Jorge Martins Sarkis¹; Rogério Calazans Verly²; Cintia Adriana Azevedo de Liz Anhaia³

RESUMO

As Obras de Arte Especiais (OAEs), como pontes e viadutos, desempenham um papel crucial na infraestrutura de transporte. No âmbito Federal, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é responsável por gerir e manter todas as estruturas pertencentes à Malha Rodoviária Federal (MRF) no Brasil. Para garantir continuamente a segurança, durabilidade e funcionalidade, é essencial realizar o monitoramento do estado de condição dessas estruturas, por meio das inspeções periódicas. Até o momento, o DNIT utiliza um único indicador para avaliar o estado de condição e indicar estratégias de atuação para a manutenção das estruturas. Neste artigo, apresenta-se a proposição de indicadores de desempenho como ferramentas analíticas de suporte à tomada de decisão no âmbito da gerência de estruturas na Autarquia. Os índices avaliam objetivamente aspectos específicos das estruturas, como a obsolescência funcional, durabilidade e o aspecto estrutural. No que se refere à avaliação funcional, foi empregada a metodologia Analytic Hierarchy Process (AHP) na combinação de fatores intrínsecos à obra e que impactam na funcionalidade da estrutura. Quanto à durabilidade, foram realizadas adaptações da metodologia GDE/UnB, assim como para a formulação do indicador de avaliação estrutural. Com base no Índice Funcional (IF), Índice de Durabilidade (ID) e o Índice Estrutural (IE), os gestores podem tomar decisões embasadas, além de priorizar investimentos durante o planejamento das ações de manutenção e reabilitação das estruturas de forma otimizada, visando atender aos objetivos e metas estratégicas do órgão.

PALAVRAS-CHAVE: Obras de Arte Especiais; DNIT; indicadores de desempenho; suporte à decisão.

ABSTRACT

Structures, such as bridges and viaducts, play a crucial role in transport infrastructure. At the Federal level, the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) is responsible for managing and maintaining all structures belonging to the Federal Highway Network (MRF) in Brazil. To continuously guarantee safety, durability, and functionality, it is essential to monitor the condition of these structures through periodic inspections. To date, DNIT uses a single index to assess the condition state and indicate action strategies for the maintenance of structures. In this article, we present the proposition of performance indexes as analytical tools to support decision-making within the scope of structure management in the Autarchy. The indexes objectively evaluate specific aspects of the bridges, such as functional obsolescence, durability, and structural appearance. Concerning functional assessment, the Analytic Hierarchy Process (AHP) methodology was used to combine the bridge's intrinsic factors, which impact the functionality of the structure. Regarding durability, adaptations were made to the GDE/UnB methodology, as well as for the formulation of the structural assessment indicator. Based on the Functional Index (IF), Durability Index (ID), and Structural Index (IE), managers can make informed decisions, in addition to prioritizing investments during the planning of maintenance and rehabilitation actions of structures in an optimized way, aiming to meet the organization's strategic objectives and goals.

KEYWORDS: Structures; DNIT; Performance index; Support decision-making.

¹ Consórcio Engefoto-Pavesys, paulosantana@consorcioep.com.br; sarahbrito@consorcioep.com.br; wallasaraujo@consorcioep.com.br; jorgesarkis@consorcioep.com.br

² Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), rogerio.calazans@dnit.gov.br

² Engefoto, cintializ@engefoto.com.br



INTRODUÇÃO

As Obras de Arte Especiais (OAEs), como pontes e viadutos, desempenham um papel crucial na infraestrutura de transporte. No âmbito Federal, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), órgão responsável pela gestão da Malha Rodoviária Federal (MRF) no Brasil, tem a incumbência de gerir e manter todos os seus ativos. Para assegurar de forma contínua a segurança, durabilidade e funcionalidade das estruturas, é crucial realizar inspeções regulares para monitorar o estado de condição dessas estruturas. A gerência de estruturas consome os dados de avaliação das estruturas e, por meio de ferramentas analíticas, realiza a priorização dos investimentos a serem empregados na manutenção do parque de obras, visando atender às metas institucionais da Autarquia.

O planejamento das ações de manutenção em estruturas é pautado, principalmente, no desempenho dos ativos. Também denominados “indicadores”, a sua utilização na gerência de estruturas favorece o monitoramento das atividades realizadas, assim como a avaliação do impacto de diferentes cenários de investimentos na qualidade da rede de estruturas. Na prática, existem dois tipos de abordagem na gestão de ativos: “de cima para baixo” (*top-down*) e “de baixo para cima” (*bottom-up*). A primeira é focada no planejamento e gerenciamento estratégico no nível de rede, enquanto a segunda compreende a análise no nível de projeto que, por sua vez, dita a estratégia de rede (MATOS e CASAS, 2017). A Figura 1, a seguir, demonstra os níveis de tomada de decisão comumente encontrados em uma agência de infraestrutura.

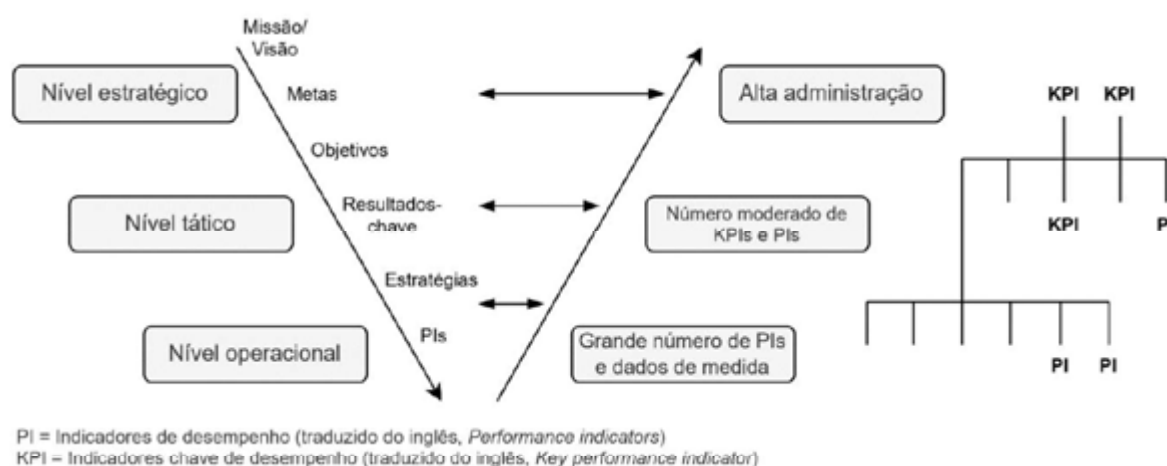


Figura 1 – Níveis de planejamento (adaptado de MATOS e CASAS, 2017)

A figura acima traz luz sobre o processo de gerenciamento de ativos, principalmente a respeito das decisões tomadas nos diferentes estratos de uma organização. Observa-se, também, o uso de indicadores de desempenho (PIs) e de indicadores chave de desempenho (KPIs) como ferramentas de gestão.

Partindo do nível estratégico, a alta administração de uma agência é responsável por definir quais serão os compromissos firmados com a sociedade relacionados à atuação do órgão, traduzidos pela



DOI: [10.29327/1430212.49-75](https://doi.org/10.29327/1430212.49-75)

INDICADORES DE DESEMPENHO COMO FERRAMENTA DE SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO PARA A GERÊNCIA DE ESTRUTURAS NO ÂMBITO DO DNIT

sua missão e visão. Nesse nível, são estabelecidos as metas e os objetivos, acompanhados por meio dos indicadores chave de desempenho, bem como o valor de investimento disponível para a execução de obras. No nível tático, a gerência do órgão é responsável por cumprir as metas de desempenho definidas pela alta administração e, ao mesmo tempo, atender às restrições orçamentárias impostas. Nesse nível, o papel da gerência é traduzir os objetivos do nível estratégico em “o quê”, “onde” e “quando” realizar as ações no nível tático e operacional. O acompanhamento das ações e a efetividade destas está intimamente relacionado aos indicadores chave de desempenho, que são alimentados pelos indicadores de desempenho. Por fim, a execução das ações em campo compete ao nível operacional, inclusive as atividades de monitoramento, realizadas por meio de inspeções, ensaios e outros tipos de avaliação de desempenho. O resultado desses levantamentos é indispensável para o cômputo dos indicadores. Observa-se, portanto, a similaridade, ante o exposto, em relação à estrutura organizacional do DNIT: a tomada de decisão é realizada pelas diretorias (nível estratégico), pelas coordenações (nível tático) e pelas unidades descentralizadas (nível operacional).

Atualmente o DNIT dispõe de um único indicador que representa a avaliação da condição global das estruturas, retrata a criticidade dos danos, define a indicação das intervenções (manutenção e reabilitação) e é empregado na priorização dos investimentos. Dessa maneira constitui-se um desafio a proposição de novos indicadores de desempenho para auxiliar na gerência de estruturas no âmbito do DNIT. O presente trabalho propõe a implementação de três indicadores de desempenho, sendo eles: Índice Funcional (IF), Índice de Durabilidade (ID) e Índice Estrutural (IE), que servem como ferramentas analíticas para o suporte à tomada de decisão, uma vez que sintetizam avaliações específicas com relação à parâmetros funcionais, de durabilidade e estruturais das OAEs.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na Austrália, tanto em abordagens *top-down* como *bottom-up*, indicadores de desempenho são fundamentais para guiar o planejamento das ações, seja em função dos recursos disponíveis ou das metas institucionais da agência. São considerados indicadores-chave: condição, segurança, nível de suficiência e confiabilidade da rede, que aborda critérios relacionados à ataques sísmicos, possibilidade de erosões, confiabilidade estrutural e rotas alternativas (AUSTROADS, 2013).

No guia de codificação para o inventário de estruturas (FHWA, 1995), o aspecto referente à suficiência da estrutura é retratado de maneira geral em um indicador que engloba diversas análises, como a adequação estrutural e segurança (avaliação da superestrutura e infraestrutura, classificação do inventário), capacidade de manutenção e obsolescência funcional (quantidade de faixas, Volume Médio Diário (VMD), largura da rodovia, largura da estrutura, tipo e importância da rodovia, gabaritos, nível d'água, dentre outros), e essencialidade para o uso público (comprimento do desvio, VMD e importância da rodovia).

Em 2015, Rashidi, Samali e Sharafi (2015) publicaram a proposição de um índice de prioridade que tem o objetivo de auxiliar à tomada de decisão quanto ao planejamento das ações de manutenção nas estruturas. O indicador conta com três fatores, que pondera características das obras sobre os seguintes aspectos: eficiência estrutural, eficiência funcional e impacto ao cliente. Desse estudo foram analisados os termos componentes do fator de eficiência funcional que, no cômputo do índice de prioridade proposto pelos autores, tem um peso adotado de 20%. Os autores ponderaram os



seguintes atributos da estrutura, com os respectivos pesos indicados entre parênteses: capacidade de carga (70%), avaliada conforme a norma de projeto australiana AS 5100.7, gabarito vertical (10%), gabarito horizontal (10%), tipo de barreira instalada (5%) e condição da drenagem do tabuleiro (5%).

Os parâmetros considerados são obtidos, principalmente, a partir dos dados de inspeções cadastrais e rotineiras. Além disso, dados de projeto são necessários, como é o caso da capacidade de carga, tendo este o maior peso atribuído para a eficiência funcional de uma OAE. Destaca-se que, dentre os parâmetros considerados no estudo, apenas características inerentes às OAEs são levantadas, ou seja, são atributos que não se alteram em função de fatores externos, exceto quando a estrutura passa por grandes modificações em suas características, como uma reabilitação, por exemplo.

No que se refere aos estudos relativos à durabilidade das estruturas, além das avaliações de inventário e classificação dos elementos, por meio de notas, uma metodologia desenvolvida e aperfeiçoada por pesquisadores brasileiros aborda especificamente o tema da deterioração em estruturas de concreto. A Metodologia GDE/UnB foi desenvolvida por Castro (1994), com o objetivo de avaliar quantitativamente estruturas de concreto convencionais. Após uma série de aplicações realizadas por Lopes (1998), Boldo (2002) e Fonseca (2007), obteve-se um melhor ajuste das formulações e dos parâmetros empregados com foco em estruturas de concreto de edificações.

Uma aplicação posterior foi realizada por Euqueres (2011), em onze pontes escolhidas aleatoriamente no estado de Goiás. Por fim, resumizando todo o arcabouço técnico adquirido ao longo das aplicações da metodologia GDE/UnB em estruturas, seja em edificações ou em OAEs, a pesquisa de Verly (2015) apontou fragilidades do modelo quando aplicado em OAEs, além de particularidades da formulação que evoluíram com o tempo. O estudo então propôs uma correção para a formulação do grau de deterioração da estrutura, sanando os problemas observados e detalhando em exemplos o impacto da proposta de alteração na formulação.

Resumidamente, Verly (2015) apresenta a metodologia GDE/UnB como sendo um processo composto por etapas que abrangem atividades de escritório e de campo, sendo que as etapas de campo podem se limitar à atribuição dos valores para os Fatores de intensidade (F_i) do dano e para os Fatores de ponderação (F_p) de um dano. Já em escritório, podem ser criadas regras para o Fator de relevância estrutural (F_r) a ser aplicado para todas as famílias de elementos, independentemente da inspeção do indivíduo. O procedimento para o cálculo do grau de deterioração de uma estrutura se inicia com o cálculo do Grau do dano (D), seguido do Grau de deterioração do elemento (G_{de}), que considera todos os danos atribuídos ao mesmo elemento. Em seguida, determina-se o Grau de deterioração de uma família de elementos (G_{df}), e por fim, o Grau de deterioração da estrutura (G_d). De acordo com os resultados obtidos por Euqueres (2011) e Verly (2015), a metodologia GDE/UnB se mostrou bastante promissora quando aplicada também à Obras de Arte Especiais, considerando sobretudo os ajustes na formulação propostos por Verly (2015). Assim, o G_d pode ser adaptado às necessidades do DNIT de maneira a compor um indicador de desempenho especializado na avaliação da durabilidade das estruturas.

No que se refere à avaliação estrutural em OAEs, além da condição frente aos danos identificados na estrutura por meio das inspeções rotineiras, a análise da redundância estrutural é um tema discutido há muito tempo nos documentos técnicos e manuais para inspetores em agências de infraestrutura



DOI: [10.29327/1430212.49-75](https://doi.org/10.29327/1430212.49-75)

INDICADORES DE DESEMPENHO COMO FERRAMENTA DE SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO
PARA A GERÊNCIA DE ESTRUTURAS NO ÂMBITO DO DNIT

internacionais (FHWA, 2012). A redundância estrutural é um conceito de grande relevância na análise estrutural e avaliação da estabilidade de estruturas, visto que a capacidade de redistribuição de esforços, bem como a configuração do sistema construtivo adotado em uma estrutura, podem ser determinantes no comportamento dela, tanto em casos de colapso parcial quanto progressivo. O mesmo manual estabelece que o principal tipo de redundância a ser avaliado nas estruturas é a redundância para os caminhos de carga. Consideram-se nesse tipo de redundância as estruturas projetadas com três ou mais elementos principais para o caminho das cargas entre apoios. Entende-se que, em caso de falha de um desses elementos, a carga pode ser redistribuída para os demais elementos e a estrutura pode vir a não sofrer um colapso global. Abaixo de três elementos principais, as estruturas são consideradas não redundantes.

No campo de pesquisa de métodos para priorização de estruturas, Darban *et. al.* (2021) empregaram o Analytic Hierarchy Process (AHP) como ferramenta para priorizar OAEs no Irã, fazendo uso de dados de monitoramento da saúde estrutural do parque de obras. Os resultados da pesquisa indicaram a possibilidade de uso do método AHP em programas de priorização, devido a facilidade de implementação da metodologia e flexibilidade para adaptação de acordo com os requisitos de cada gestor.

METODOLOGIA

Nos itens a seguir são apresentadas as sistemáticas utilizadas pelos autores nas proposições do Índice Funcional, Índice de Durabilidade e Índice Estrutural, considerando o embasamento teórico apresentado anteriormente.

Analytic Hierarchy Process (AHP)

Com base na pesquisa de Rashidi, Samali e Sharafi (2015) e, considerando as necessidades do DNIT, foram adaptados os parâmetros sugeridos pelos autores para a avaliação funcional das estruturas. No lugar de pesos arbitrados para cada parâmetro, utilizou-se uma análise de importância entre as variáveis, por meio do método AHP, em dois níveis. Ampliando o escopo de variáveis a serem analisadas, apresenta-se, a seguir, os parâmetros para a avaliação funcional das estruturas sob administração do DNIT que compõem o Índice Funcional:

- **TT** – Capacidade de carga, avaliada conforme o trem-tipo de projeto da OAE e o ano de construção;
- **ER** – Percentual de estrangulamento da plataforma da rodovia sobre a OAE, em conjunto com a extensão da OAE;
- **BNJ** – Tipo de barreira instalada;
- **GV** – Deficiência funcional de gabarito vertical;
- **DR** – Deficiência funcional de drenagem de pista;
- **PA** – Ausência de passeio para pedestres.

Com relação a capacidade de carga, uma vez que o conhecimento da capacidade resistente de uma estrutura envolve grandes incertezas, sobretudo em estruturas sujeitas a carregamentos móveis e efeitos de fadiga, optou-se por utilizar a informação do trem-tipo de projeto, se conhecido. Durante as inspeções, em caso de desconhecimento da informação baseada em registros do projeto de construção, o inspetor pode aproximar a informação do trem-tipo e do ano de construção em função



da geometria e características físicas da obra, comparando com os requisitos dispostos no Manual de Inspeção de Obras de Arte Especiais (BRASIL, 2004). O percentual de estrangulamento da plataforma da rodovia sobre a OAE e a extensão são parâmetros que, quando analisados em conjunto, representam uma análise de segurança e limitação do nível de serviço da rodovia devido à obsolescência funcional da estrutura. Os tipos de barreiras instaladas são avaliados considerando que o padrão New Jersey é o mais adequado, por questões de segurança. Logo, outros tipos de barreiras e também a ausência delas, são levadas em consideração na análise de importância dos parâmetros. Deficiências funcionais de gabarito vertical, drenagem de pista e a ausência de passeio para pedestres são outros critérios importantes para a funcionalidade da estrutura, indicados nas inspeções cadastrais.

Para cada uma das variáveis, são atribuídos fatores de criticidade, quanto à obsolescência funcional, que variam de 1 a 4, sendo 1 o fator menos crítico e 4 o mais crítico. O método AHP foi aplicado em dois níveis, ou seja, primeiramente foram analisadas as importâncias isoladas dos critérios considerados, por exemplo: trem-tipo é um critério mais importante que o tipo de barreira instalada? Ou a deficiência funcional de gabarito vertical é um critério mais importante que a ausência de passeio para pedestres? A matriz de importância dos critérios (nível 1) é apresentada na Figura 1, a seguir.

	TT	ER	BNJ	GV	DR	PA	Autovetor
TT	1	0,25	0,50	3	5	0,33	0,111
ER	4,000	1	3	7	9	2	0,394
BNJ	2,000	0,333	1	4	6	0,50	0,165
GV	0,333	0,143	0,250	1	2	0,20	0,049
DR	0,200	0,111	0,167	0,500	1	0,14	0,030
PA	3,000	0,500	2,000	5,000	7,000	1	0,251

Figura 1 – AHP Nível 1: critérios

Nos subcritérios (nível 2), são definidos os graus de importância entre as características analisadas. Da Figura 2 a 7, a seguir, apresentam-se as matrizes de importância obtidas para todos os subcritérios. Na análise do estrangulamento da rodovia sobre a OAE (Figura 3), o percentual de estrangulamento é representado por w e a extensão da OAE é representada por EX .

TT	Fator crit.	Classe 24 (Até 1960)	Classe 36 (1961 a 1985)	Classe 45 (1986 a 2013)	Classe 45 (Após 2013)	Autovetor
Classe 24 (Até 1960)	4	1	2	3	4	0,469
Classe 36 (1961 a 1985)	3	0,500	1	2	3	0,280
Classe 45 (1986 a 2013)	2	0,333	0,500	1	1	0,136
Classe 45 (Após 2013)	1	0,250	0,333	1	1	0,115

Figura 2 – AHP Nível 2: subcritério TT



DOI: 10.29327/1430212.49-75

INDICADORES DE DESEMPENHO COMO FERRAMENTA DE SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO
PARA A GERÊNCIA DE ESTRUTURAS NO ÂMBITO DO DNIT

ER	Fator crit.	w ≥ 40% & EX ≥ 50m	w ≥ 40% & EX < 50m	31% ≤ w < 40% & EX ≥ 100m	31% ≤ w < 40% & EX < 100m	16% ≤ w < 31% & EX ≥ 150m	16% ≤ w < 31% & EX < 150m	w < 16%	Autovetor
w ≥ 40% & EX ≥ 50m	4	1	2	4	5	6	7	8	0,372
w ≥ 40% & EX < 50m	3,75	0,500	1	2	4	5	6	7	0,245
31% ≤ w < 40% & EX ≥ 100m	2,90	0,250	0,500	1	2	4	5	6	0,156
31% ≤ w < 40% & EX < 100m	2,70	0,200	0,250	0,500	1	2	4	5	0,099
16% ≤ w < 31% & EX ≥ 150m	1,80	0,167	0,200	0,250	0,500	1	2	4	0,063
16% ≤ w < 31% & EX < 150m	1,60	0,143	0,167	0,200	0,250	0,500	1	2	0,038
w < 16%	1	0,125	0,143	0,167	0,200	0,250	0,500	1	0,026

Figura 3 – AHP Nível 2: subcritério ER

BNJ	Fator crit.	Barreira inexistente	Guarda-corpo obsoleto ou qualquer	Barreira New Jersey	Autovetor
Barreira inexistente	4	1	3	9	0,658
Guarda-corpo obsoleto ou qualquer	3	0,333	1	6	0,282
Barreira New Jersey	1	0,111	0,167	1	0,080

Figura 4 – AHP Nível 2: subcritério BNJ

GV	Fator crit.	Gabarito vertical insuficiente	Sem deficiência de gabarito vertical	Autovetor
Gabarito vertical insuficiente	4	1	5	0,833
Sem deficiência de gabarito vertical	1	0,200	1	0,167

Figura 5 – AHP Nível 2: subcritério GV

DR	Fator crit.	Drenagem de pista insuficiente	Sem deficiência de drenagem	Autovetor
Drenagem de pista insuficiente	4	1	3	0,750
Sem deficiência de drenagem	1	0,333	1	0,250

Figura 6 – AHP Nível 2: subcritério DR

PA	Fator crit.	Calçada para pedestre inexistente	Sem deficiência de passeio	Autovetor
Calçada para pedestre inexistente	4	1	9	0,900
Sem deficiência de passeio	1	0,111	1	0,100

Figura 7 – AHP Nível 2: subcritério PA

Com todos os subcritérios definidos e fatores de criticidade atribuídos, o método AHP retorna um autovalor que é utilizado na combinação com o autovalor do critério analisado no nível 1. Assim, o



cálculo do Índice Funcional é realizado por meio da Equação 1, a seguir, e o seu valor final é convertido para uma escala contínua que varia de 0 a 10, onde 0 significa uma obra totalmente suficiente e 10 significa uma obra totalmente deficiente, em termos do aspecto funcional.

$$IF = (p_{TT,1} \cdot p_{TT,2}) + (p_{ER,1} \cdot p_{ER,2}) + (p_{BNJ,1} \cdot p_{BNJ,2}) + (p_{GV,1} \cdot p_{GV,2}) + (p_{DR,1} \cdot p_{DR,2}) + (p_{PA,1} \cdot p_{PA,2}) \quad (3)$$

Onde,

$P_{TT,1}$ e $P_{TT,2}$ – Autovalores do trem-tipo para os níveis 1 e 2, respectivamente;

$P_{ER,1}$ e $P_{ER,2}$ – Autovalores do estrangulamento da rodovia para os níveis 1 e 2, respectivamente;

$P_{BNJ,1}$ e $P_{BNJ,2}$ – Autovalores do tipo de barreira instalada para os níveis 1 e 2, respectivamente;

$P_{GV,1}$ e $P_{GV,2}$ – Autovalores do gabarito vertical para os níveis 1 e 2, respectivamente;

$P_{DR,1}$ e $P_{DR,2}$ – Autovalores da drenagem de pista para os níveis 1 e 2, respectivamente;

$P_{PA,1}$ e $P_{PA,2}$ – Autovalores da ausência de passeio para os níveis 1 e 2, respectivamente.

Metodologia GDE/UnB

A proposição do Índice de Durabilidade baseou-se no cálculo do G_d da metodologia GDE/UnB, salvo algumas adaptações necessárias nos fatores de intensidade e de ponderação. Para a determinação do F_i foi utilizada uma proposta de Estado de Condição (EC) para cada dano na estrutura. Para o F_p foram propostos pesos para cada dano aplicável a cada elemento presente no Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO), com foco no impacto à durabilidade da estrutura. Para o cálculo do G_d , foi utilizada uma adaptação da formulação já corrigida por Verly (2015), com o objetivo de alterar a escala final do ID para que o mesmo varie de 0 a 100 em 5 classes discretas com razão igual a 20. A equação ajustada para o cálculo do ID é apresentada na Equação 2, a seguir.

$$ID = \frac{K_{máx}}{8,8885} \sqrt{1 + \frac{(\sum_{i=1}^n K_i) - K_{máx}}{\sum_{i=1}^n K_i}} \quad (2)$$

Onde $K_{máx}$ é o maior valor dentre os K_i , que representa o produto entre os $G_{df,i}$ e o respectivo Fator de relevância estrutural (F_r) de cada família. n é o número de famílias da estrutura. A constante 8,8885 é um ajuste para que a escala do G_d , ou seja, do ID, seja de 0 e 100.

Redundância estrutural

Com o objetivo de incluir a análise da redundância estrutural no cômputo do Índice Estrutural de OAEs, buscou-se empregar sistemáticas simplificadas, observando características de cadastro das estruturas. Dessa maneira, considerando que a redundância transversal tem uma importância mais acentuada que as demais elencadas na literatura, evidenciou-se três grupos de famílias de elementos: aparelhos de apoio, arcos e pontes sobre vigas. Outros sistemas construtivos como pontes em laje, viga caixão e outros, são grupos onde a análise da redundância transversal não se aplica.

A proposição do Índice Estrutural visa não destoar significativamente da filosofia atualmente empregada no DNIT para a Nota Técnica (NT), atribuída a cada família de elementos durante as

DOI: [10.29327/1430212.49-75](https://doi.org/10.29327/1430212.49-75)INDICADORES DE DESEMPENHO COMO FERRAMENTA DE SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO
PARA A GERÊNCIA DE ESTRUTURAS NO ÂMBITO DO DNIT

inspeções, tendo em vista que esse indicador possui um forte viés de criticidade. Portanto, propõe-se que a avaliação estrutural de uma OAE seja comandada por dois indicadores. O primeiro é a Nota Técnica, adicionando-se a ela a avaliação dos possíveis ganhos decorrentes de uma eventual capacidade de redistribuição de esforços, devido à redundância transversal da estrutura em cada vão. O segundo indicador é o Índice Estrutural, que terá o papel de avaliar a extensão dos problemas identificados nas estruturas, por meio de uma adaptação da metodologia GDE/UnB, tal como realizado no cálculo do grau de deterioração da estrutura.

A ideia de utilizar a metodologia GDE/UnB é a de agregar defeitos, partindo-se da condição mais grave de um elemento, ainda que seja considerada a possibilidade de redundância transversal. Dessa maneira, propõe-se uma rotina de avaliação da existência de redundância transversal em cada vão da estrutura, com o objetivo de considerar um possível ajuste de nota para aquele(s) elemento(s) principal(is) que estejam com a menor Nota Técnica dentre os elementos do mesmo vão. Importante destacar que, por se tratar de um procedimento analítico para gerência, os dados de avaliação das estruturas não são alterados no banco de dados. A Equação 3, a seguir, apresenta o cálculo da NT ajustada para o caso de haver redundância transversal dos elementos principais por vão da estrutura. O valor final é arredondado para o inteiro mais próximo.

$$NT^+ = arred \left\{ NT + \left(\frac{Q_{elem}}{Q_{NT \leq 2}} \cdot \frac{\sum NT}{80} \right) \right\} \quad (3)$$

Onde NT é a Nota Técnica atribuída pelo inspetor para o elemento individual. Q_{elem} é a quantidade de elementos considerados no vão. $Q_{NT \leq 2}$ é a quantidade de elementos no vão com NT menor ou igual a 2 e $\sum NT$ é o somatório de todas as NTs dos elementos individuais no vão analisado. Uma vez realizado o possível ajuste de notas daqueles elementos principais em pior condição, busca-se, por componente da estrutura (transição, vão ou apoio), a menor NT dentre todos os elementos vinculados, não apenas dentre os elementos ditos principais para a redundância. Nesse processo, considera-se que os elementos com função secundária também possuem relevância ao ponto de poderem subsidiar a NT do componente, acrescentando-se 1 ponto à NT originalmente atribuída, se a mesma for menor que 5. Desse modo, o cálculo do Índice Estrutural é realizado por meio da Equação 4, proposta em adaptação à formulação da metodologia GDE/UnB, e utilizando as Equações 5 e 6, a seguir.

$$IE = K_{1,máx} \sqrt{1 + \frac{\sum_{i=1}^n K_{2,i} - K_{1,máx}}{\sum_{i=1}^n K_{2,i}}} \quad (4)$$

$$K_1 = NT_{c,i} \cdot Fr_{c,i} \quad (5)$$

$$K_2 = NT_{e,i}^+ \cdot Fr_{e,i} \quad (6)$$

Onde n é a quantidade de elementos individuais da estrutura, $K_{1,máx}$ é o maior valor da variável K_1 . $K_{2,i}$ é o valor da variável K_2 para o elemento individual i . K_1 é o produto da NT do componente i ($NT_{c,i}$) pelo Fator de relevância do componente i ($Fr_{c,i}$). K_2 é o produto da NT do elemento i , que pode ser ajustada em função da redundância transversal ($NT_{e,i}^+$) pelo Fator de relevância do elemento i ($Fr_{e,i}$). Quanto ao Fr_c , adotou-se para a transição, vão e apoio os seguintes valores: 5, 4 e 5, respectivamente. Para o Fr_e , atribuíram-se valores numa escala de 1 a 5, para todas as famílias de elementos cadastradas no SGO. Por fim, no cálculo das variáveis K_1 e K_2 , a NT dos elementos e dos



componentes da estrutura é transformada, de modo a priorizar os indivíduos em pior estado, ou seja, para que o maior produto ressalte as piores notas. Assim, em ambas as equações, a NT é transformada, por exemplo, de 5 para 0, de 4 para 1, de 3, para 2, de 2 para 4 e de 1 para 5.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a aplicação da proposição do Índice Funcional foram utilizados dados de cadastro de todas as estruturas do banco de dados do SGO. Já as aplicações das proposições dos Índices de Durabilidade e Estrutural foram realizadas em caráter teórico, por meio de planilhas eletrônicas e exemplos genéricos, uma vez que o SGO mantém o cadastro de estruturas em nível de família de elementos e, portanto, a ausência da individualidade dos elementos e danos impossibilitou a aplicação para todo o banco de dados de estruturas.

Dessa forma, neste capítulo apresentam-se os resultados e discussões acerca da aplicação de cálculo para o Índice Funcional de OAEs. O indicador combina características de cadastro das estruturas para representar, em um número, o seu grau de obsolescência funcional. A metodologia proposta foi operacionalizada em planilhas eletrônicas. Na Tabela 1, a seguir, apresentam-se as principais características consideradas para o cálculo do indicador referentes a três estruturas do banco de dados. Os valores entre parênteses referem-se aos fatores de criticidade para cada subcritério na análise pelo método AHP.

Tabela 1 – Características das OAEs e cálculo do Índice Funcional

Código SGO	130149	160100	060861
Tipologia da estrutura	2 vigas de concreto armado	2 vigas de concreto armado	6 vigas de concreto protendido
Trem-tipo	Classe 24 (4)	Classe 24 (4)	Classe 45 (1)
Ano de construção	1951	1950	Não informado
Extensão (m)	168,70	50,50	91,00
w (%)	56 (4)	42 (4)	1 (1)
Barreira New Jersey	Não (3)	Não (3)	Sim (1)
Gabarito vertical	Suficiente (1)	Suficiente (1)	Suficiente (1)
Drenagem de pista	Insuficiente (4)	Suficiente (1)	Insuficiente (4)
Necessidade de passeio	Sim (4)	Não (1)	Não (1)
Índice Funcional (IF)	8,19	4,06	0,29

De acordo com a Figura 8, a seguir, observam-se as diferenças elencadas na Tabela 1 para as três estruturas analisadas. O percentual de estrangulamento da rodovia foi maior nas estruturas com trem-tipo de projeto mais antigo e ausência de barreira New Jersey, sendo fatores que impactam consideravelmente no nível de serviço da rodovia no ponto onde se encontra a OAE. Dentre as estruturas analisadas, a que possui o Código SGO 130149 se destacou com um elevado IF, visto que além das demais características, foi indicada em seu cadastro a necessidade de passeio para pedestres e, de acordo com o Nível 1 do método AHP, esse critério possuiu o segundo maior peso na análise de importância.



DOI: [10.29327/1430212.49-75](https://doi.org/10.29327/1430212.49-75)

INDICADORES DE DESEMPENHO COMO FERRAMENTA DE SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO
PARA A GERÊNCIA DE ESTRUTURAS NO ÂMBITO DO DNIT



OAE Código SGO 130149



OAE Código SGO 160100



OAE Código SGO 060861

Figura 8 – OAEs utilizadas no teste de aplicação da proposição do Índice Funcional (SGO, 2024)

CONCLUSÕES

A necessidade atual da gerência de estruturas no âmbito do DNIT em avaliar, separadamente, os parâmetros funcional, de durabilidade e estrutural, tem como objetivo criar ferramentas analíticas para dar suporte à tomada de decisão. No nível estratégico, a alta administração pode definir metas específicas para esses indicadores na criação de um plano plurianual de investimentos, cujo controle pode ser feito via indicadores de desempenho nos níveis tático e operacional da Autarquia. Metodologias empregadas em outras agências, sobretudo internacionais, além de uma metodologia desenvolvida por pesquisadores brasileiros foram estudadas com o objetivo de avaliar os parâmetros considerados e propor modificações para sua aplicação à realidade do DNIT. A disponibilidade e facilidade de obtenção dos dados também foi um critério utilizado para avaliar quais características seriam consideradas.

Assim, o Índice Funcional melhor traduz as necessidades de reabilitação das estruturas, elencando características que avaliam o grau de deficiência funcional, não necessariamente sendo indicada esse tipo de intervenção por avaliação da condição frente aos defeitos identificados. Nesse sentido age o Índice de Durabilidade, ponderando cada dano e seus impactos na durabilidade da estrutura, sendo um índice suficiente para gerir as necessidades de manutenção. O Índice Estrutural e a atual Nota Técnica dão importância para a redundância estrutural e insuficiências estruturais que geram riscos tangíveis de colapso. Uma estrutura com um problema estrutural grave e localizado poderá ter um alto IE, devido à sua relevância quanto à criticidade. Outros problemas localizados elevam com pouca significância o indicador, mantendo a prioridade em função do problema mais crítico.



Paulo Fernando Matos de Santana, Jorge Martins Sarkis,
Sarah da Silva Brito, Rogério Calazans Verly,
Wallas Borges Araújo, Cintia Adriana Azevedo de Liz Anhaia

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSTROADS. Bridge Management Using Performance Models. Austroads, ISBN 978-1-925037-36-4. Sydney, Australia. 2013.
- BOLDO, P. Avaliação quantitativa de estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro. Dissertação de Mestrado. Publicação E.DM-01A/02. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 295p. 2002.
- BRASIL, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa (DPP). Coordenação do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias – Publicação 709. 2ª edição. Rio de Janeiro. 2004.
- CASTRO, E.K. Desenvolvimento de metodologia para manutenção de estruturas de concreto armado. Dissertação de Mestrado. Publicação E.DM-04A/94. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 185p. 1994.
- DARBAN, S.; GHASEMZADEH TEHRANI, H.; KARBALLAEZADEH, N.; MOSAVI, A. Application of Analytical Hierarchy Process for Structural Health Monitoring and Prioritizing Concrete Bridges in Iran. Applied Sciences, v.11, n.17, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11178060>.
- EUQUERES, E.K. Metodologia de inspeção de pontes de concreto armado. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 168p. 2011.
- FHWA, Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation. Office of Engineering Bridge Division. Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges. Report N° FHWA-PD-96-001. December, 1995. Washington, D.C.
- FHWA, Federal Highway Administration. Bridge Inspector's Reference Manual (BIRM). Report n° FHWA NHI 12-049. Virginia, USA. 2012. Arlington, Virginia
- FONSECA, R.P. A estrutura do Instituto Central de Ciências: Aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e propostas de manutenção. Dissertação de Mestrado. Publicação E.DM-06A/07. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 213p. 2007.
- LOPES, B.A.R. Sistema de manutenção predial para grandes estoques de edifícios: Estudo para inclusão do componente "Estrutura de Concreto". Dissertação de Mestrado. Publicação E.DM-11A/98. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 308p. 1998.
- MATOS, J.C.; CASAS, J.R. COST Action TU1406 – WG2 Technical Report: Performance goals for Roadway Bridges. ISBN: 978-3-900932-41-1. 2017.
- RASHIDI, M., SAMALI, B., SHARAFI, P. A new model for bridge management: Part A: condition assessment and priority ranking of bridges. Australian Journal of Civil Engineering, 2015.
- VERLY, R.C. Avaliação de metodologias de inspeção como instrumento de priorização de intervenções em obras de arte especiais. Dissertação de Mestrado. Publicação E.DM-015A/15. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 178p. 2015.



INSPEÇÕES EM OBRAS DE ARTE ESPECIAIS DA MALHA RODOVIÁRIA DO ESPÍRITO SANTO

Mariana Maretto Motta¹; Isis Cler Depolli²; Pedro Henrique Avancini Guimarães³ & Maria Juliana Anastácio Santana⁴

RESUMO

O Departamento de Edificações e de Rodovias do Espírito Santo (DER-ES), a fim de levantar a atual situação de todas as Obras de Arte Especiais (OAE) existentes na malha rodoviária sob sua administração, realizou a contratação de serviços técnicos especializados de pesquisa, cadastro, inspeção cadastral e avaliação de todas as pontes com base na ABNT NBR 9452 (2019), DNIT 010 PRO (2004) e no Manual de Inspeções de Pontes Rodoviárias – DNIT. As inspeções que estão sendo realizadas consistem na verificação visual das características geométricas e estruturais, das manifestações patológicas e das anomalias nas estruturas e em seus elementos. A partir dos resultados está sendo elaborado um plano de manutenção e reabilitação das estruturas. Até o momento, 722 pontes já foram inspecionadas por todo o estado, indicando desde estruturas em excelentes condições até obras com riscos iminentes de colapso. A maior parte das OAE vistoriadas foram classificadas com condição de estabilidade boa e aparentemente boa, sendo observado que as estruturas com notas inferiores, classificadas como precárias e sofríveis, estão concentradas na região Sul do estado. Ações urgentes foram planejadas e estão sendo executadas para os casos mais graves. Para as estruturas com danos mais brandos estão sendo elaboradas planilhas, que objetivam a contratação de serviços de manutenção e conservação. O DER-ES visa manter um monitoramento regular das pontes sob sua responsabilidade, via inspeções regulares a fim de garantir a segurança e a funcionalidade interrompida da malha rodoviária estadual.

PALAVRAS-CHAVE: Pontes; inspeção cadastral; conservação; manutenção.

ABSTRACT

The Departamento de Edificações e de Rodovias do Espírito Santo (DER-ES), in order to survey the current situation of all bridges existing on the state highway network under its administration, contracted specialized technical services for research, registration, cadastral inspection and evaluation of all bridges based on ABNT NBR 9452 (2019), DNIT 010 PRO (2004) and the Manual de Inspeções de Pontes Rodoviárias – DNIT. The inspections being carried out consist of visual verification of geometric and structural characteristics, pathological manifestations and anomalies in the structures and their elements. Based on the results, a maintenance and rehabilitation plan for detected defects and pathologies is being drawn up. To date, 722 bridges have been inspected across the state, indicating everything from structures in excellent condition to works with imminent risk of collapse. Most of the bridges inspected were classified as having good and apparently good stability conditions. The majority of works with lower grades, classified as precarious and poor, are concentrated in the southern region of the state. In view of this, urgent actions have been planned and are being carried out for the most serious cases. For structures with milder damage, spreadsheets are being prepared to contract maintenance and conservation services. DER-ES aims to maintain regular monitoring of the bridges under its responsibility, via regular inspections in order to guarantee the safety and uninterrupted functionality of the state road network.

KEY WORDS: Bridges; cadastral inspection; conservation; maintenance

¹DER-ES, Av. Marechal Mascarenhas de Moraes 1501 - Ilha de Santa Maria, Vitória - ES, 29.051-015, e-mail: mariana.motta@der.es.gov.br; ³ pedro.guimaraes@der.es.gov.br; ⁴ mariajulianaanastacio@yahoo.com.br

²IFES-ES, Rodovia BR-381 799 – Santa Luzia, Nova Venécia – ES, 29.830-000, e-mail: isiscler@gmail.com;



INTRODUÇÃO

No início do século XX, o Estado do Espírito Santo contava com 24 municípios e uma população de aproximadamente 209 mil habitantes. A principal concentração populacional estava localizada no Sul, devido aos prósperos anos da cafeicultura, que se estenderam até a década de 1960. O Norte do estado era a região menos povoada. A primeira ponte da região só foi construída em 1928 sobre o Rio Doce (A GAZETA, 2019).

É evidente que estruturas mais antigas demandam ações de manutenção mais intensivas para garantir sua segurança e funcionalidade, portanto, observou-se que a infraestrutura rodoviária da região Sul do estado esteja sob condições funcionais inferiores se comparada a do Norte, cujas rodovias foram construídas mais recentemente à medida que a região se desenvolvia, possuindo estrutura mais moderna e resistente, essas foram projetadas levando-se em consideração padrões de engenharia mais atualizados e materiais mais duráveis, resultando em uma necessidade menor de manutenção em comparação com suas contrapartes no Sul.

As normas ABNT 9452 (2023) e a DNIT 010 PRO (2004) estabelecem os tipos de inspeções necessárias em todas as fases da vida de uma Obra de Arte Especial (OAE). Essas inspeções podem ser: cadastral, realizada para avaliar as características iniciais da estrutura; rotineira, ocorre regularmente para identificar problemas ao longo do tempo; especial, para situações específicas que demandam atenção; e a extraordinária, para emergências ou problemas graves.

O monitoramento contínuo da condição das obras é crucial para garantir a segurança e a continuidade do uso das rodovias. A curva Pavlovsky e Frolov (curva PF) caracteriza o comportamento do ativo ao longo do tempo e o tipo de manutenção a ser dado, considerando a falha funcional e potencial do mesmo. A luz desse conceito gráfico, compreende-se que quanto mais se adia ou negligencia a manutenção das obras de infraestrutura, maiores são os custos e os transtornos para corrigir as manifestações patológicas. Com o objetivo de avaliar a situação atual e elaborar um plano de manutenção para as OAE, o Departamento de Edificações e Rodovias do Espírito Santo (DER-ES) contratou serviços técnicos especializados de pesquisa, cadastro, inspeção cadastral e avaliação de todas as 850 pontes da malha rodoviária estadual, de norte ao sul do estado. A contratação envolve dois produtos: produto 1 — que consiste principalmente no cadastro das OAEs — e produto 2, que fornece informações sobre as condições, o estado de conservação e as indicações dos serviços de reparo necessários.

Diante de um cenário econômico que impede a realização de serviços de manutenção e conservação em todas as estruturas, as informações levantadas a partir destas inspeções permitem a criação de uma ordem de priorização para aplicação dos recursos disponíveis. Assim, tendo sido inspecionadas 84,94% das pontes, o órgão objetiva, a curto prazo, a realização de ações de reparo e recuperação nas situações mais críticas — ações estas que já estão em andamento — e, a longo prazo, a criação e aplicação de um plano de manutenção e reabilitação das estruturas.

METODOLOGIA DAS INSPEÇÕES

A classificação das OAE envolve a avaliação de sua condição atribuindo notas de 1 a 5 ao aspecto funcional, estrutural e de durabilidade, refletindo a gravidade dos problemas identificados e orientando a priorização de intervenções, conforme apresentado na Tabela 1.



DOI: 10.29327/1430212.49-74

INSPEÇÕES EM OBRAS DE ARTE ESPECIAIS DA MALHA RODOVIÁRIA DO ESPÍRITO SANTO

Tabela 1: Classificação da OAE segundo parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade. (Adaptado de DNIT, 2004)

Nota	Danos no elemento / Insuficiência estrutural	Ação corretiva	Condições estabilidade	Classificação das condições da ponte
5	Não há danos nem insuficiência estrutural.	Nada a fazer.	Boa	Obra sem problemas.
4	Há alguns danos, mas não há sinais de que estejam gerando insuficiência estrutural.	Nada a fazer apenas serviços de manutenção.	Boa	Obra sem problemas importantes.
3	Há danos gerando alguma insuficiência estrutural, mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra.	A recuperação da obra pode ser postergada, devendo-se, porém, neste caso, colocar-se o problema em observação sistemática.	Boa aparentemente	Obra potencialmente problemática. Recomenda-se acompanhar a evolução dos problemas através das inspeções rotineiras.
2	Há danos gerando significativa insuficiência estrutural na ponte, porém não há ainda, aparentemente, um risco tangível de colapso estrutural.	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) da obra deve ser feita no curto prazo.	Sofrível	Obra problemática. Postergar demais a recuperação da obra pode levá-la a um estado crítico. Inspeções intermediárias são recomendáveis para monitorar os problemas.
1	Há danos gerando grave insuficiência estrutural na ponte; o elemento em questão encontra-se em estado crítico, havendo um risco tangível de colapso estrutural.	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) - ou em alguns casos, substituição da obra - deve ser feita sem tardar.	Precária	Obra crítica. Pode configurar uma situação de emergência, podendo a recuperação da obra ser acompanhada de medidas preventivas especiais

Obs: A nota final da ponte corresponde a menor dentre as notas recebidas pelos seus elementos com função estrutural.

Após recebimento dos produtos da inspeção cadastral, realizou-se uma análise da condição de cada estrutura, de seus elementos estruturais e das patologias observadas em cada um deles. Seguindo a metodologia proposta no Programa de Recuperação de Obras de Arte Especiais (Proarte) do DNIT, foram criados três índices, funcional, estratégico e operacional relacionado, respectivamente, nota técnica da estrutura e o volume médio diário (VMD) do trecho, situação da via – duplicada, pavimentada, leito natural, etc – e o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal e VMD do trecho e o VMD máximo em trecho estadual. A partir destes índices criou-se uma ordem de priorização das estruturas e, caso a caso, seguindo esta ordem, são definidas as ações a serem tomadas.

MALHA RODOVIÁRIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

Análise Hidrográfica e Topográfica Do Espírito Santo

De acordo com o Plano Estadual de Recurso Hídricos do Espírito Santo (2020), nas regiões Norte e Noroeste do estado, tem-se uma baixa incidência de chuvas, o que contribui para a ocorrência de um balanço hídrico insuficiente, ou seja, a quantidade de água necessária para as diversas atividades é menor que a quantidade de água disponível nas bacias hidrográficas. Enquanto que nas bacias do Sul do estado, quase todos os anos, observa-se eventos de inundações devido a fortes chuvas, com prejuízos para muitas pessoas e para as atividades produtivas, além de darem causa para patologias nas estruturas. Com relação a topografia, apresentada na Figura 1, pode-se notar que na região Sul do estado do Espírito Santo há predominância de relevo montanhoso e acidentado, caracterizado pelas serras e planaltos que se estendem ao longo dessa região. Essas áreas são marcadas por altitudes mais elevadas, vales profundos e rios sinuosos. Por outro lado, a topografia do Norte do estado é geralmente mais suave e menos acidentada em comparação com a do Sul. Nessa região, as colinas e pequenas elevações são mais predominantes.

A topografia montanhosa e hidrografia da região sul apresenta desafios significativos para a construção e manutenção de obras de infraestrutura. Além disso, deslizamentos de terra, quedas de rochas e erosão podem danificar as obras de arte especiais exigindo reparos constantes para garantir a segurança dos usuários.



Mariana Maretto Motta, Isis Cler Depolli,
 Pedro Henrique Avancini Guimarães & Maria Juliana Anastácio Santana

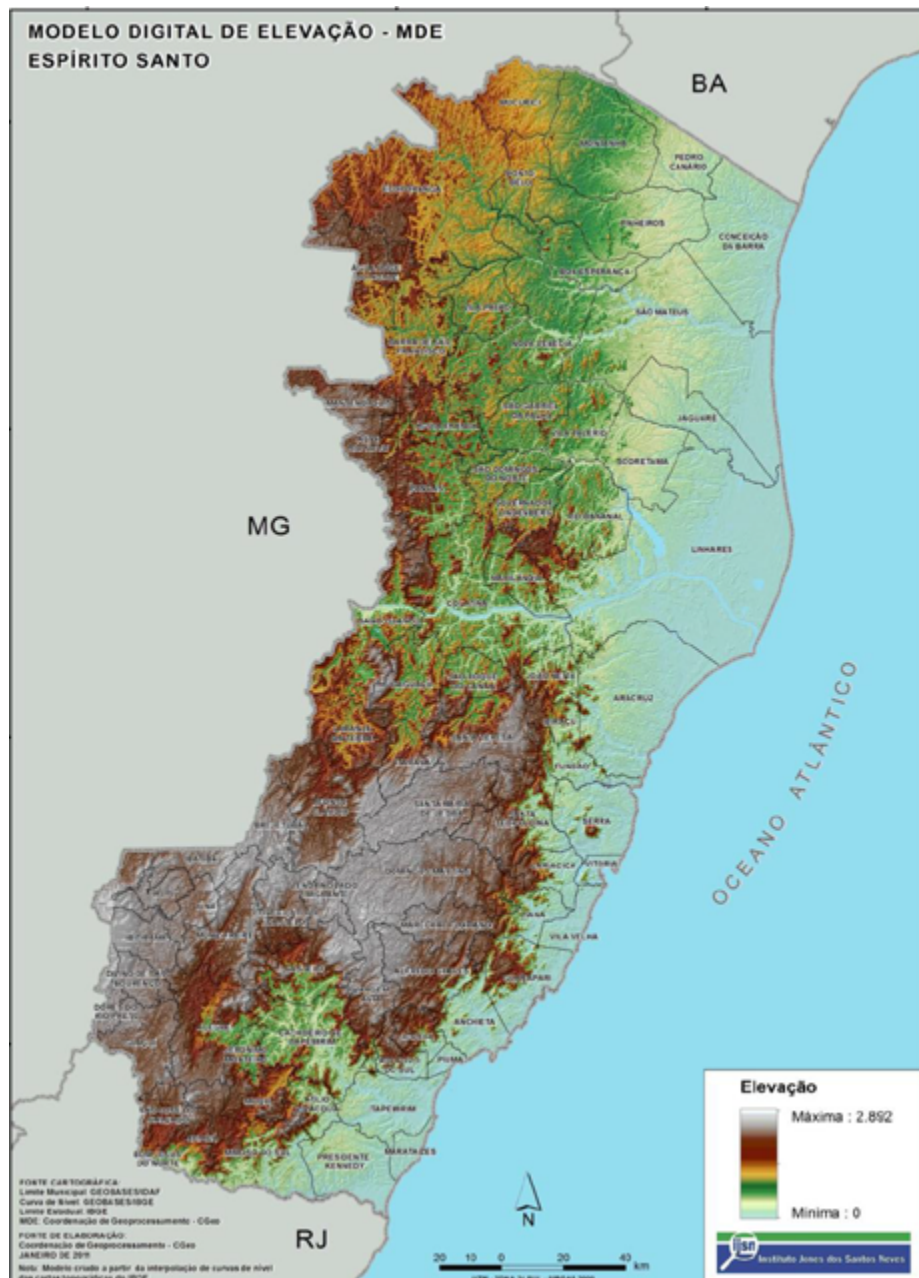


Figura 1. Mapa de elevação do Espírito Santo. (INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES, 2011)

Sistema Rodoviário Do Estado Do Espírito Santo

O DER-ES, órgão gerenciador da malha rodoviária estadual, possui sua estrutura organizacional desconcentrada, tem sede e foro na Cidade de Vitória e atuação em todo o estado do Espírito Santo. A fim de se fazer presente em todo o estado, existem as Superintendências Executivas Regionais (SR), as quais competem, dentre outras atribuições, o gerenciamento dos trechos das rodovias estaduais que se encontram na sua área de atuação e abrangência. A seguir tem-se, na Figura 2, o mapa que demarca as áreas de abrangência de cada SR.



DOI: 10.29327/1430212.49-74

INSPEÇÕES EM OBRAS DE ARTE ESPECIAIS DA MALHA RODOVIÁRIA DO ESPÍRITO SANTO

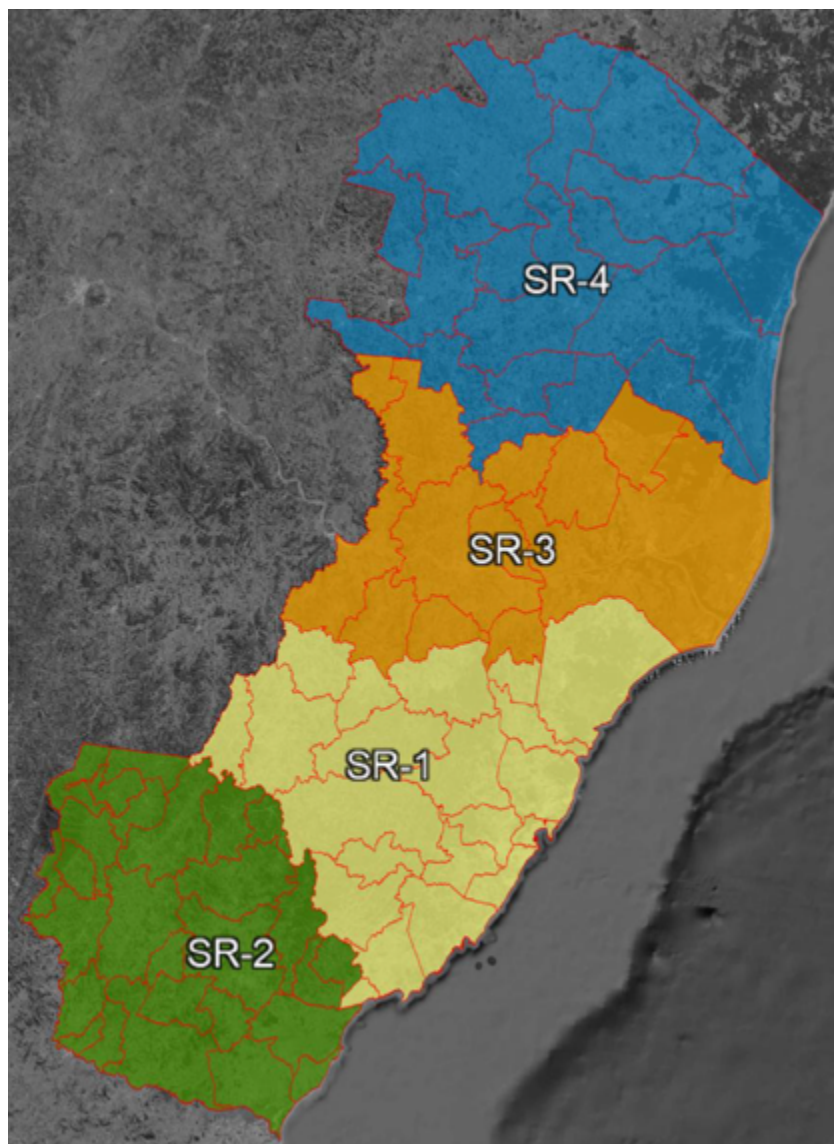


Figura 2. Mapa da área de atuação e abrangência das Superintendências Executivas Regionais. (DER-ES, 2021)

Segundo dados do DER-ES, o estado do Espírito Santo possui 107 rodovias estaduais, totalizando aproximadamente 5.758,83 km. Na Tabela 2 apresenta-se a distribuição das rodovias estaduais por região e a situação física das rodovias existentes por região.

Tabela 2. Malha Rodoviária Estadual. (DER-ES, 2024)

Unidade administrativa	Situação Física (km)				Total*	Área total (km²)
	PAV	LEN	DUP	EOP		
SR-1	924,46	471,96	46,88	32,56	1.475,86	10.745,01
SR-2	1.087,73	294,88	11,77	90,98	1.485,37	9.802,62
SR-3	789,94	455,42	0,00	40,73	1.286,09	9.947,30
SR-4	924,42	521,23	6,15	59,72	1.511,51	15.579,51
Total (km) - ES	3.726,55	1.743,49	64,80	223,99	5.758,83	46.074,45

Legenda:
PAV – Pavimentada; LEN - Leito natural; DUP – Duplicada; EOP - Em obras de pavimentação
* Tem-se 678,45 km de rodovia planejada que deverá ser construída nos próximos anos que não constam nessa tabela.



A partir da tabela apresentada é possível notar que a densidade rodoviária (km/km^2) existente no Centro (SR-1 - $13,74 \text{ km}/\text{km}^2$) e Sul (SR-2 - $15,15 \text{ km}/\text{km}^2$) do estado é maior do que a existente no Norte (SR-3 - $12,93 \text{ km}/\text{km}^2$ e SR-4 - $9,70 \text{ km}/\text{km}^2$). Atualmente o estado tem 64,71% das suas Rodovias pavimentadas; 30,28% estão em Leito Natural; 1,13% das rodovias são duplicadas e 3,89% estão em obras de pavimentação.

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DAS INSPEÇÕES DAS PONTES

Tem-se aproximadamente, na malha rodoviária estadual, 850 pontes. Das quais 722 já foram inspecionadas até a presente data.

A Tabela 3 apresenta a quantidade de estruturas classificadas com cada uma das notas técnicas. Até então, a nota mais atribuída às OAE foi 4, que corresponde a 309 (42,80%) das 722 pontes vistoriadas; essa nota caracteriza obras em *boas* condições, sem problemas importantes, cujos danos não incorrem em insuficiência estrutural. A segunda nota mais atribuída foi 3, correspondendo à 272 obras (37,67%); caracterizadas como *boa aparentemente*, tratam-se de obras problemáticas que devem ser observadas de maneira sistemática e recuperadas sem demora.

Tabela 3: Quantitativo por nota das OAE presentes na malha rodoviária estadual já vistoriadas. (DER-ES, 2024)

NOTA	QUANTITATIVO ESTADUAL POR NOTA (Q.E.)
1	12 (1,66%)
2	97 (13,43%)
3	272 (37,67%)
4	309 (42,80%)
5	32 (4,43%)
QUANT. ESTADUAL TOTAL (Q.E.T)	722 (100%)

Na e tem-se a distribuição das OAE dentro do estado, conforme cadastro realizado. A região Central (SR1 - 30,19%) e Sul (SR2 - 29,64%) do estado correspondem juntas a 432 (59,83%) do total. A menor concentração de OAE está, como esperado, na região Norte SR3 - 18,14% e SR4 - 22,02%. Esse cadastro evidencia a maior densidade de infraestrutura rodoviária na região Central e Sul, que se deve a causas explicadas anteriormente, como ordem de povoamento, topografia e hidrografia dessas regiões.

Tabela 4: Apresentação das OAE vistoriadas por Superintendência Regional (SR) e relação entre o Quantitativo Regional Total (Q.R.T.) e o Quantitativo Estadual Total (Q.E.T.). (DER-ES, 2024)

SR	QUANTITATIVO REGIONAL TOTAL (Q.R.T)
1	218 (30,19%)
2	214 (29,64%)
3	131 (18,14%)
4	159 (22,02%)
QUANT. ESTADUAL TOTAL (Q.E.T)	722 (100%)



DOI: 10.29327/1430212.49-74

INSPEÇÕES EM OBRAS DE ARTE ESPECIAIS DA MALHA RODOVIÁRIA DO ESPÍRITO SANTO

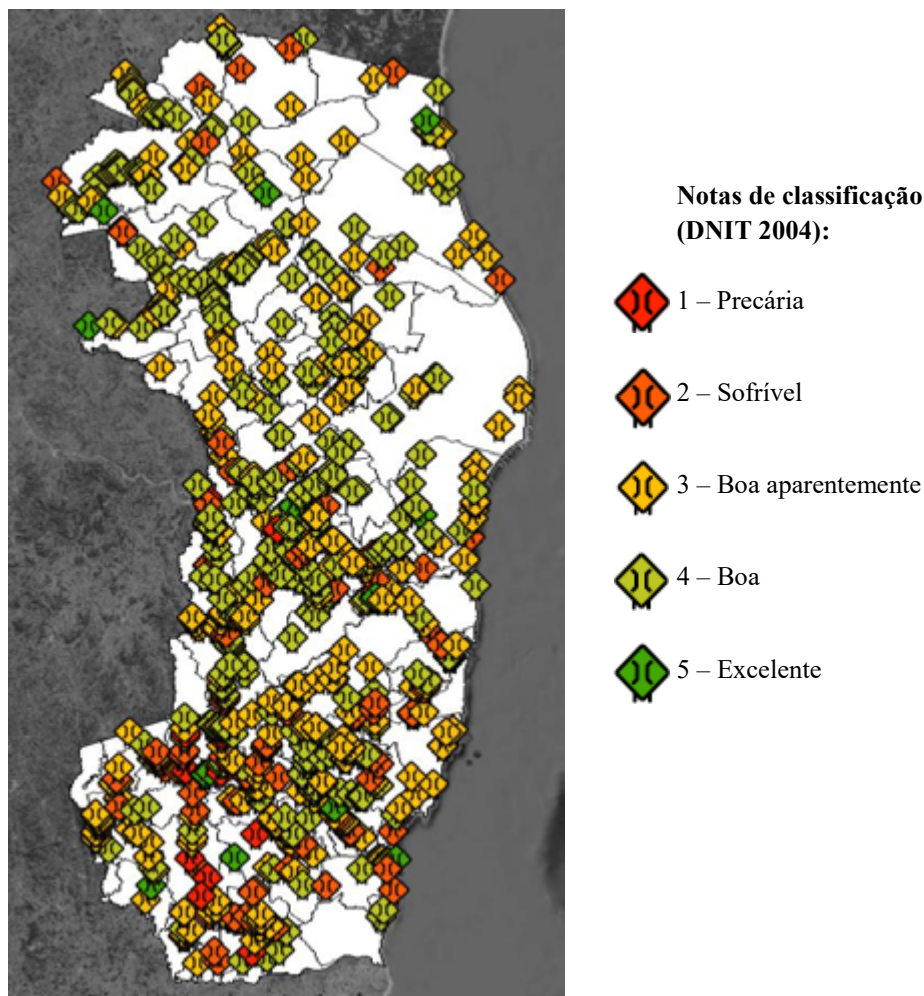


Figura 3. Mapa de localização e condição das 722 OAE inspecionadas. (DER-ES, 2024)

A Tabela 5 apresenta-se a distribuição das OAE por notas e por região, onde se constata que 57 (52,29%) de todas as OAE com nota 1 e 2 (109 pontes) estão na região Sul do estado, seguida da região Central (SR-1) que concentra 30 (27,52%) das estruturas nessas condições. Na região Norte a SR-3 e a SR-4 possuem, cada, 11 obras (10,09%) com essas classificações. Por outro lado, com relação às pontes em boas condições (notas 4 e 5) de um total de 341, tem-se que 75 (21,99%) estão na SR-3, 94 (27,57%) na SR-4, 104 (30,5%) na SR-1 e 68 pontes (19,94%) na SR-2.

Tabela 5: Distribuição das OAE por notas e por região. Relação entre o Quantitativo Regional (Q.R.) por nota e o Quantitativo Regional Total (Q.R.T.). (DER-ES, 2024)

NOTA	QUANTITATIVO REGIONAL (Q.R.) POR NOTA			
	SR-1	SR-2	SR-3	SR-4
1	0 - (0%)	9 - (4,21%)	2 - (1,53%)	1 - (0,63%)
2	30 - (13,76%)	48 - (22,43%)	9 - (6,87%)	10 - (6,29%)
3	84 - (38,53%)	89 - (41,59%)	45 - (34,35%)	54 - (33,96%)
4	94 - (43,12%)	56 - (26,17%)	71 - (54,20%)	88 - (55,35%)
5	10 - (4,59%)	12 - (5,61%)	4 - (3,05%)	6 - (3,77%)
QUANT. REGIONAL TOTAL (Q.R.T.)	218 - (100%)	214 - (100%)	131 - (100%)	159 - (100%)



Em síntese, os dados apresentados na Tabela 6 evidenciam uma disparidade significativa na distribuição das condições das OAE entre as distintas regiões do estado. A região Sul se destaca por concentrar a maioria das obras com classificações inferiores em razão de fatores como a ordem de povoamento, topografia e hidrografia dessa região

Tabela 6: Relação percentual entre o Quantitativo Regional (Q.R.) e o Quantitativo Estadual (Q.E.). (DER-ES, 2024)

NOTA	RELAÇÃO ENTRE Q.R. E Q.E			
	SR-1	SR-2	SR-3	SR-4
1	0,00%	75,00%	16,67%	8,33%
2	30,93%	49,48%	9,28%	10,31%
3	30,88%	32,72%	16,54%	19,85%
4	30,42%	18,12%	22,98%	28,48%
5	31,25%	37,50%	12,50%	18,75%
QRT	30,19%	29,64%	18,14%	22,02%

Pontes Nota Técnica Geral 1

As pontes nessas condições apresentam diversas manifestações patológicas. Na superestrutura cita-se a grande ocorrência de fissuração e a desagregação do concreto, que gera a corrosão da armadura e diminui a vida útil dos elementos. Suas causas devem-se especialmente a má execução do concreto nos casos de estrutura moldada in loco e, principalmente, a fadiga estrutural nos casos de vigamento pré-moldado. A fadiga estrutural, também responde pela degradação das juntas de dilatação. Em boa parte dessas OAE nota-se na superestrutura, devido ao tráfego intenso, o assentamento diferencial dos apoios, as flechas excessivas e o desgaste acentuado do tabuleiro.



Figura 4. (a) Tabuleiro com oxidação das armaduras e deslocamento do concreto (falta de cobertura), ruptura estrutural do encontro; (b) Desgaste e deformação excessiva do tabuleiro devido ao tráfego intenso e falta de manutenção periódica. (DER-ES, 2024)

Na mesoestrutura, ocorre frequentemente a erosão dos taludes, fissuras, trincas, rachaduras nos encontros e na junção com as alas, manchas de infiltração e lixiviação do concreto. Quando a estrutura é de concreto armado, é frequente a corrosão da armadura. Essas anomalias geralmente possuem como causa principal a falta de projeto estrutural para os encontros/pilares, a má execução do concreto e/ou a falta de manutenção periódica.

Com relação a infraestrutura cita-se — como um dos problemas mais recorrentes — a erosão da superfície ou remoção de material pela correnteza, ocasionado pela falta de enrocamento de proteção.



DOI: [10.29327/1430212.49-74](https://doi.org/10.29327/1430212.49-74)

INSPEÇÕES EM OBRAS DE ARTE ESPECIAIS DA MALHA RODOVIÁRIA DO ESPÍRITO SANTO

De acordo com o DNIT 010 PRO (2004), de modo geral, essas pontes apresentam alto grau de instabilidade, decorrentes de danos que geram grave insuficiência estrutural. Os elementos estruturais encontram-se em estado crítico e há risco tangível de colapso estrutural. Nesses casos tem-se uma situação de emergência, podendo a recuperação ser acompanhada de medidas como restrição ou interdição parcial ou total do tráfego, escoramentos etc.



Figura 5. (a) Caso típico de falta de projeto para os encontros/alas das pontes; (b) Erosão dos materiais pela correnteza do rio, devido à falta de enrocamento para proteção dos encontros e dos pilares. (DER-ES, 2024)

Pontes Nota Técnica Geral 2

Nessas, comumente, tem-se a presença de armaduras expostas na superestrutura. Na supra, meso e infraestrutura há rachaduras, desagregação, nichos de concretagem e manchas de infiltração. Também na infraestrutura haverá indícios de erosão de materiais, porém em menor grau se comparado as pontes com nota técnica 1.

Essas obras necessitam de intervenções a curto prazo, postergar as ações de recuperação pode levar a estrutura a um estado crítico. Deve-se realizar inspeções intermediárias a fim de monitorar os problemas.



Figura 6. (a) Deslocamento e oxidação das armaduras; (b) Construção dos encontros sem projeto, remoção dos materiais pela correnteza, devido à falta de enrocamento de proteção. (DER-ES, 2024)

Pontes Nota Técnica Geral 3

Na superestrutura geralmente há nichos de concretagem, falta de cobrimento e pontos de armadura oxidada e/ou pontos de desagregação. Na mesoestrutura tem-se frequentemente a separação dos encontros e alas. Na infraestrutura, concreto desagregado e início de erosão devido a remoção de materiais decorrente da correnteza. Em toda a estrutura notar-se-á desgaste natural dos elementos.

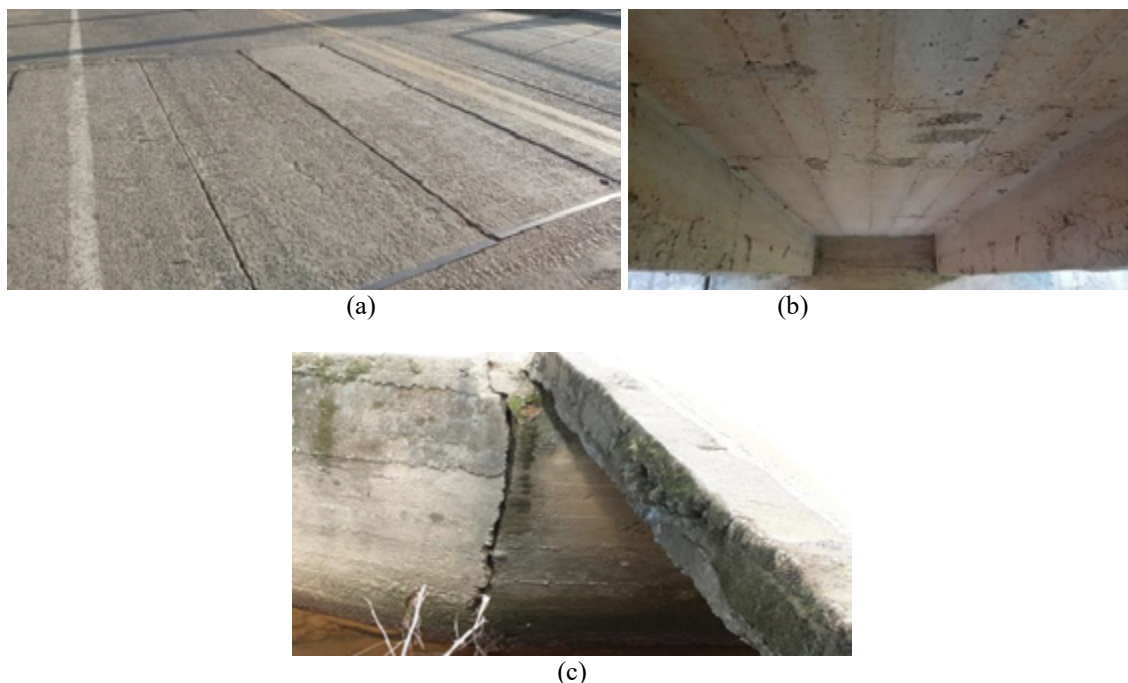


Figura 7. (a) Tabuleiro com desgaste natural; (b) Superestrutura moldada in loco com presença de nichos de concretagem e deslocamento; (c) Caso típico de rachadura entre encontro e ala, decorrente da movimentação do terrapleno, da falta de armadura na ligação e da ausência de enrocamento para proteção. (DER-ES, 2024)

Pontes Nota Técnica Geral 4

Apresentam boas condições gerais, existem danos, mas não há sinais que estejam gerando insuficiência estrutural. Nessas OAE deve-se realizar serviços de manutenção conforme recomendam as normas.



Figura 8. (a) Tabuleiro com pouco desgaste natural; (b) Super e mesoestrutura em bom estado, necessitam de serviços simples de manutenção e limpeza, sem indícios de danos que possam gerar insuficiência estrutural. (DER, 2024)

Pontes Nota Técnica Geral 5

Possuem condições satisfatórias, com danos inexistentes, irrelevantes e/ou isolados, apresentam segurança e conforto aos usuários. Recomenda-se apenas manutenção rotineira.



DOI: 10.29327/1430212.49-74

INSPEÇÕES EM OBRAS DE ARTE ESPECIAIS DA MALHA RODOVIÁRIA DO ESPÍRITO SANTO



Figura 9. (a) e (b) Tabuleiro, guarda-corpos e calçadas em ótimas condições, elementos sem danos e sem desgaste. (DER-ES, 2024)



Figura 10. (a) Viga moldada in loco sem indícios de deslocamento do concreto, nichos de concretagem, oxidação de armaduras ou outras patologias; (b) Encontros sem danos, com enrocamento de proteção para evitar erosão dos materiais devido a correnteza. (DER-ES, 2024)

CONCLUSÃO

A partir das análises apresentadas, é notável que a região Sul possui a maior quantidade de OAE em condição *precária* e *sofrível*. Isso deve-se a ordem de povoamento do estado, a topografia acidentada dessa região, a hidrografia com rios sinuosos e aos eventos frequentes de chuvas intensas.

Nota-se uma supremacia de obras em boas condições na região Central (30,49%) — devido aos maiores investimentos que são feitos nas regiões próximas à Capital Vitória — e Norte (SR-3, 21,99% e SR-4, 27,56%), devido às estruturas dessas regiões serem mais recentes com tecnologia e materiais de melhores qualidade.

Até abril de 2024, considerando que os serviços estão em andamento, 42,80% (309) possuem nota 4, ou seja, estão em condições funcionais e sem danos importantes, nessas faz-se apenas ações de manutenção periódica. A nota 3 corresponde a 37,67% (272), as quais possuem danos gerando alguma insuficiência estrutural, mas sem sinais de comprometimento da estabilidade da obra, nessas devem ser realizadas ações de recuperação e observação sistemática dos problemas. A nota 2 corresponde a 13,44% (97) das obras, nelas há danos ocasionando alguma insuficiência estrutural, porém sem um risco tangível de colapso, necessitam de intervenção a curto prazo. Apresentaram nota 5, 4,43% (32), caracterizadas por estarem em perfeitas condições funcionais e estruturais. Por fim 1,66% (12) estão com nota 1, ou seja, possuem grave insuficiência estrutural e risco tangível de colapso estrutural.

Das 12 pontes com nota 1, sete são de estrutura de madeira e deverão ser demolidas e reconstruídas. Essa ação também será realizada para a Ponte sobre o Córrego que liga ao Rio Guandu (ver Figura



4), que atualmente encontra-se interditada parcialmente. Para as quatro pontes de concreto armado restantes, realizar-se-á também novo projeto. Com relação às 97 obras com nota de classificação 2, condição *sofrível*, tem sido realizada análise individual pelos técnicos do DER-ES. Em doze delas já foi iniciado o processo de troca de vigas pré-moldadas, nessas a superestrutura é a responsável pela nota 2. Para as OAE com nota 3 e 4, total de 272 e 309 respectivamente, será elaborada planilha para contratação dos serviços de manutenção, conserva e reparos simples, a fim de atender aos casos comuns detectados nas obras, os demais serão analisados individualmente para providências específicas.

Ademais, um novo contrato de inspeções deverá ser elaborado pelo DER-ES a fim de manter o acompanhamento periódico e a situação atualizada de todas as pontes sob sua administração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A GAZETA. **Como o ES aumentou o número de municípios desde 1900 e o que muda com pacto federativo.** Política, [s. l.], 2 dez. 2019. Disponível em: <<https://www.agazeta.com.br/es/politica/como-o-es-aumentou-o-numero-de-municipios-de-1900-a-2019-1219>>. Acesso em: 4 abr. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto armado — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9452: **Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2023.

DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES E DE RODOVIAS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO (DER-ES). **Sistema Rodoviário Do Estado Do Espírito Santo.** Vitória, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT 010 PRO. **Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, PROARTE. **Programa de Manutenção e Reabilitação de Estruturas.** Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/infraestrutura-rodoviaria/proarte>. Acesso em: 8 abr. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. CENSO 2022 PANORAMA. **Cidades e Estados do Brasil**, [s. l.], 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/es/panorama>. Acesso em: 12 abr. 2024.

INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES. **Espírito Santo em mapas.** 3. ed. Vitória, 2011. Disponível em: <https://ijsn.es.gov.br/Media/IJSN/PublicacoesAnexos/livros/Es_em_Mapas_3_edicao.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2024.

PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESPÍRITO SANTO (PERH/ES). **MANUAL OPERATIVO DO PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESPÍRITO SANTO**, [s. l.], 1 out. 2020. Disponível em: <https://agerh.es.gov.br/Media/agerh/Documenta%C3%A7%C3%A3o%20CBHs/De%20Olho%20no%20Rio%20-%20PERH.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2024.



CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DEFLECTOMÉTRICOS OBTIDOS COM VIGA BENKELMAN E DEFLECTÔMETRO DE PESO LEVE (LWD): ESTUDO DE CASO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PAVIMENTO

Maurício Nunes Cabral^{1,2}; Martônio José Marques Francelino¹; Wanderson Freitas Lucio²

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo de caso para reflexão das boas práticas necessárias para uma investigação a respeito dos critérios necessários para correlações das medidas de deflexão de uma pavimentação por aparelhos com funções semelhantes. As deflexões, além de desempenhar um papel fundamental na avaliação da integridade estrutural e no desempenho dos pavimentos, é uma das principais informações para dimensionamento de reforços nessas estruturas. A viga Benkelman (VB), equipamento deflectométrico bem estabelecido e de uso corriqueiro, têm seus dados amplamente utilizados como parâmetros de entrada em vários métodos para reforços no pavimento. Diante dessa perspectiva, o presente artigo tem como objetivo analisar a viabilidade do uso do ensaio do Deflectômetro de Peso Leve (LWD), cujo emprego tem crescido no transcorrer dos últimos anos, e seus dados de deflexão para os mesmos fins em que os dados da viga Benkelman são empregados. Nesse contexto, para coleta de informações comparativas, esta pesquisa, apresenta o estudo realizado em duas rodovias, ambas apresentando dois segmentos, um com revestimento em concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) e a outro sobre camada de solo natural compactado. Posteriormente, utilizando-se o software Excel, uma análise estatística com modelos de regressão foi conduzida com as medições deflectométricas obtidas em campo e comparadas com estudos de outros autores. Os resultados indicaram a impossibilidade de estabelecer, nesse estudo de caso, uma correlação válida entre os dois equipamentos, contudo possibilitam uma reflexão sobre os critérios essenciais para obtenção desses dados de campo.

PALAVRAS-CHAVE: Viga Benkelman. LWD. Deflexão

ABSTRACT

This article presents a case study for reflecting on the best practices necessary for an investigation regarding the criteria required for correlations of deflection measurements of pavement using similar devices. Deflections, in addition to playing a fundamental role in assessing structural integrity and pavement performance, are one of the key pieces of information for designing reinforcements in these structures. The Benkelman Beam (BB), a well-established and commonly used deflectometric device, has its data widely used as input parameters in various pavement reinforcement methods. Given this perspective, the present article aims to analyze the feasibility of using the Lightweight Deflectometer (LWD) test, whose use has grown in recent years, and its deflection data for the same purposes as the Benkelman Beam data. In this context, for comparative data collection, this research presents the study conducted on two highways, both featuring two segments, one with hot mix asphalt (HMA) pavement and the other over compacted natural soil. Subsequently, using Excel software, a statistical analysis with regression models was conducted with the deflectometric measurements obtained in the field and compared with studies by other authors. The results indicated the impossibility of establishing a valid correlation between the two devices in this case study; however, they do allow for reflection on the essential criteria for obtaining these field data.

KEY WORDS: Benkelman Beam. LWD. Deflection.

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica do Cabo de Sto. Agostinho - UACSA, e-mail: mauricio.nunes@ufrpe.br; martonio.francelino@ufrpe.br

² TPF Engenharia, mauricio.cabral@tpfe.com.br; wanderson.freitas@tpfe.com.br



INTRODUÇÃO

Recomenda-se que o pavimento de uma rodovia seja projetado de maneira a atender um período de vida útil, ou ciclo de vida como também pode ser denominado, devendo manter um bom estado de utilização, tendo em vista a sua importância nas atividades de transporte que, por sua vez, exercem grande impacto socioeconômico no país (DNIT, 2006).

Bernucci et al. (2022) afirmam que, geralmente, os pavimentos não falham de maneira abrupta, mas sim, por meio do processo gradual de deterioração funcional e estrutural que se acumulam ao longo do tempo em que estão sujeitos ao tráfego, até que percam sua plena serventia.

Compreender os mecanismos que desencadeiam o processo de deterioração de um pavimento é imprescindível para que haja a elucidação das razões que conduziram à sua atual situação, além de ser base importante para a escolha da técnica mais adequada para a restauração. Neste contexto, o estudo da condição estrutural do pavimento irá fornecer informações indispensáveis quanto a sua adequação estrutural, permitindo o dimensionamento de uma alternativa mais apropriada, sendo os ensaios defletoométricos os mais adequados e utilizados para a interpretação desse comportamento estrutural (DNIT, 2006).

Ensaio, ou levantamentos defletoométricos, são avaliações não destrutivas realizadas a partir de equipamentos denominados como defletoômetros, que irão mensurar as deformações elásticas verticais sofridas pelo pavimento quando estes são expostos a influência de uma carga, também conhecidas como deflexão. Rodrigues (2017) comenta que essas deflexões são responsáveis pelo aparecimento de grande parte das fissuras ao longo da existência da via, cuja continuidade pode resultar na fadiga do revestimento.

Apresentado como um dos ensaios de medida de deflexão mais usados no país, a viga Benkelman, foi desenvolvida nos Estados Unidos pelo engenheiro Arthur Benkelman em 1950 e introduzida no Brasil em 1962. Embora seja um método simples, é trabalhoso e possui baixa precisão, especialmente quando são empregadas vigas comuns não automatizadas (BERNUCCI et al., 2022). Ademais, diversos outros dispositivos para ensaios defletoométricos foram desenvolvidos ao longo dos anos, como pontuam Medina e Motta (2015), visando aprimorar os procedimentos de avaliação não destrutiva do pavimento, no sentido de aumentar a acurácia nas medições, otimizar o tempo gasto nos ensaios, simular de forma fidedigna as condições de carregamento de acordo com o tráfego, gerar dados de forma mais rápida e direta e reduzir os custos associados aos ensaios.

Neste contexto, temos a criação e uso de equipamentos denominados como “de peso batente” como o FWD (Falling Weight Deflectometer), criado no anos 1980 e implementados para uso no Brasil em 1994 (BERNUCCI et al., 2022), e posteriormente o Light Weight Deflectometer (LWD) ou defletoômetro de peso leve, caracterizado por ser um defletoômetro de impacto com cargas baixas, sendo uma versão simplificada que pode ser operada manualmente e usado durante ou após a construção das camadas do pavimento (MEDINA E MOTTA, 2015).

Conforme destacado por Rodrigues (2018), o equipamento LWD possui uma introdução mais tardia no mercado se comparado com seus precursores, entretanto, se apresenta como uma opção mais vantajosa em virtude da sua característica portátil, conferindo maior rapidez e praticidade nos ensaios. Além disso, o equipamento fornece uma leitura da via sem demandar alterações substanciais ou interrupções significativas no fluxo do tráfego local, tornando-o particularmente adequado em cenários que envolvam dificuldades de acesso para instrumentação de maior porte.

Diante desta perspectiva, o presente estudo de caso tem como objetivo identificar a existência de uma correlação entre a VB e o LWD que justificasse a viabilidade do uso do ensaio do



DOI: [10.29327/1430212.49-2](https://doi.org/10.29327/1430212.49-2)

CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DEFLECTOMÉTRICOS OBTIDOS COM VIGA BENKELMAN E DEFLECTÔMETRO DE PESO LEVE (LWD): ESTUDO DE CASO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PAVIMENTO

deflectômetro de peso leve e seus dados de deflexão para os mesmos fins em que os dados de viga Benkelman são empregados, possibilitando assim, a adoção de um equipamento mais simplificado, nas respectivas rodovias estudadas. Desta forma, pretende-se comparar e estabelecer uma correlação estatística entre as medições de deflexão obtidas pelos ensaios de viga Benkelman e LWD.

REFERENCIAL TEÓRICO

Análise de Correlação entre Dados Deflectométricos Obtidos por Diferentes Ensaios

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006), em seu manual de restauração de pavimentos asfálticos, aborda a perspectiva de estabelecer correlações entre diversos equipamentos deflectométricos. Diante do amplo uso já estabelecido da viga Benkelman e do FWD, são examinados estudos que conseguiram identificar correlações válidas. Destaca-se o trabalho de Fabrício et al. (1988), que conseguiu estabelecer uma correlação não linear altamente significativa ($R^2 = 0,95$) entre as deflexões medidas pelos equipamentos mencionados. Além disso, Borges (2001) definiu correlações lineares significantes com um coeficiente de determinação de 0,84. Esses estudos indicam a possibilidade de desenvolver modelos comparativos usuais entre dados deflectométricos obtidos com diferentes equipamentos, corroborando o objetivo central desta pesquisa.

Embora a correlação entre os dados seja viável, o DNIT (2006) destaca que os modelos são sensíveis a múltiplos fatores, uma vez que a deflexão está intrinsecamente ligada à resposta elástica da estrutura do pavimento. Consequentemente, não existem modelos genéricos capazes de serem aplicados universalmente, razão pela qual é recomendável que os projetistas desenvolvam seus próprios modelos de correlação.

Em sua dissertação, Rodrigues (2018) analisou segmentos de CBUQ sobre base granular e CBUQ sobre alvenaria de paralelepípedos. Ele constatou que, na maioria dos trechos estudados, as deflexões médias medidas pela viga Benkelman eram menores em cerca de 34% em comparação com as deflexões médias obtidas pelo LWD. O autor conseguiu encontrar correlações bastante fortes em três dos cinco trechos avaliados, sendo a mais significativa com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,90.

Beninca e Santos (2021), ao investigarem a utilização dos dois equipamentos, identificaram correlações válidas nos dados deflectométricos em dois dos treze trechos analisados ao longo de mais de 4 km de via e cerca de 80 pontos de análise. O coeficiente de determinação do modelo mais significativo foi de 0,79. De modo geral, as deflexões medidas pelo LWD superaram aquelas medidas pela viga Benkelman.

Nery e Santos (2022) avaliaram seis segmentos de uma via com 9,4 km de extensão, localizados em vias urbanas e rurais, todos pavimentados com revestimento asfáltico e com estruturas de espessuras iguais, mas diferentes materiais de reforço do subleito. Os dados obtidos pelo LWD indicaram deflexões médias maiores em comparação com as deflexões médias obtidas pela viga Benkelman. No entanto, não foram encontradas correlações válidas em nenhum dos trechos estudados, sendo o maior coeficiente de determinação igual a 0,12.

Martello e Garcez (2022) realizaram um estudo em vias pavimentadas com CCR, concreto asfáltico e solo argiloso. Foram utilizados dois equipamentos de LWD diferentes, comparando-os com uma viga Benkelman. Os valores da deflexão não seguiram um padrão consistente, às vezes sendo



maiores em um equipamento e outras vezes maiores em outro. O estudo não estabeleceu modelos de regressão, pois não foram encontradas relações significativas entre os dados deflectométricos devido à grande variabilidade nas leituras.

É relevante destacar que os autores citados anteriormente conseguiram identificar e mensurar as estruturas que estavam sendo avaliadas, obtendo informações sobre as espessuras e a idade dos pavimentos, bem como as características das camadas sobre as quais foram executados, ademais a incidência de manifestações patológicas.

METODOLOGIA

Caracterização da Área de Estudo

Os dados deflectométricos analisados neste estudo foram levantados em quatro vias urbanas, duas na cidade de Jaboatão dos Guararapes, no estado de Pernambuco, e duas vias na cidade de Maceió, Alagoas. Em cada cidade selecionou-se uma via pavimentada com CBUQ e outra não pavimentada, apresentando apenas leito natural carroçável. Ambos os segmentos demarcados para estudo em Pernambuco possuíam 12 pontos de leituras, já os de Alagoas possuíam 20 pontos na via em CBUQ e 16 pontos na via de leito natural conforme apresentam-se nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Resumo dos trechos delimitado para estudo em Jaboatão dos Guararapes, PE (Autores, 2023)

Trecho	Composição	Quantidade de Pontos
1	CBUQ	12
2	Leito Natural	12

Tabela 2. Resumo dos trechos delimitado para estudo em Maceió, AL (Autores, 2023)

Trecho	Composição	Quantidade de Pontos
3	CBUQ	20
4	Leito Natural	16

Para todas as vias estudadas foram definidos espaçamentos em cerca de 2 metros entre cada ponto de aferição, alocados convenientemente sobre a trilha de roda, respeitando a distância mínima da borda do revestimento, conforme indicado na norma DNIT 133/2010.

Ressalta-se que as vias pavimentadas com CBUQ, não tiveram as espessuras de suas camadas estruturantes levantadas em campo, entretanto, a partir de análise visual, apresentavam boas condições superficiais. Já as vias que possuíam o revestimento composto por solo natural, além de não identificadas as camadas estruturantes, o Índice de Suporte Califórnia (ISC) e o grau de compactação também não foram levantados.

Estudos de Campo: Ensaio de Viga Benkelman e LWD

A realização das atividades de campo em Jaboatão dos Guararapes/PE aconteceu em 31 de janeiro de 2023, em um dia sem incidência de chuvas, com o tempo ensolarado e temperatura média de 27 °C.

Já os ensaios em Maceió/AL foram realizados no dia 01 de fevereiro de 2023, sob um tempo chuvoso com temperatura média de 26 °C.



DOI: [10.29327/1430212.49-2](https://doi.org/10.29327/1430212.49-2)

CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DEFLECTOMÉTRICOS OBTIDOS COM VIGA BENKELMAN E DEFLECTÔMETRO DE PESO LEVE (LWD): ESTUDO DE CASO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PAVIMENTO

Realizado de forma simultânea, as leituras do LWD e VB em cada ensaio foram realizadas lado a lado, alinhados a um mesmo ponto, posicionando o aparelho de LWD ao lado do eixo traseiro de rodas duplas utilizado como carga de prova da viga Benkelman, com distância entre um e outro variável, mas não superior a 1,00 metro. Dessa forma, tentou-se verificar áreas que compartilham características estruturais mais semelhantes possíveis, conforme mostrado nas Figuras 1 e 2. Tal procedimento de ensaio comparativo foi experimental, e não se apresenta normatizado nas literaturas técnicas.



Figura 1. Realização dos ensaios de LWD e VB lado a lado (AUTORES, 2023)



Figura 2. Realização dos ensaios de LWD e VB (AUTORES, 2023)

O levantamento de dados deflectométricos com a viga Benkelman foi regido de acordo com a norma DNIT 133/2010. O equipamento possuía relação 2/1 (constante da viga, de acordo com o tamanho dos seus braços), a carga de prova empregada foi o caminhão com eixo traseiro de rodas duplas possuindo 8,2 tf e o ensaio se deu obedecendo a seguinte ordem:

- Foi posicionada ponta de prova da VB entre os pneus de uma das rodas do eixo traseiro do caminhão, alinhando-a sob o seu eixo;
- Foi aferida e registrada a leitura inicial (L_i) no extensômetro;
- O caminhão foi afastado lentamente para uma distância superior a 5 metros da ponta de prova para que a estrutura retornasse ao seu estado original. É válido pontuar que esse item foi adaptado da norma, que indica 10 metros de afastamento final do caminhão, uma vez que não se detectava variação de leitura acusada pelo extensômetro após 5 metros;
- Foi aferida e registrada a leitura final (L_f) no extensômetro;
- Os dados aferidos foram inseridos na Equação 1, apresentada anteriormente, e com auxílio de uma planilha eletrônica (MS Excel) foi calculada a deflexão do ponto ensaiado.

Para as leituras de deflexão a partir do LWD foi usado um equipamento da marca Zorn Instruments, referência ZFG 3000, que possui peso de impacto de 10 kg e placa com 300mm de dimensão. O ensaio foi realizado de acordo com as recomendações da norma americana ASTM E2835-21, seguindo a seguinte ordem:

- O LWD foi posicionado no ponto de análise com superfície limpa (Sem vegetação ou material solto);
- O leitor digital é ligado e o peso móvel é posicionado no topo do equipamento;



- c) O peso móvel é liberado pelo operador do ensaio por 3 vezes, registrando 3 medidas no leitor digital do equipamento;
- d) A deflexão final é calculada automaticamente por média aritmética dos dados aferidos a partir dos 3 impactos sobre o ponto, e exibida pelo leitor digital do equipamento.

Análise Estatística

Buscou-se estabelecer uma equação que pudesse descrever a interdependência entre duas grandezas e avaliar a validade desse modelo, para isso foi feita um estudo de regressão, que se acordo com Lopes (2003) é uma análise que pode ser realizada com o intuito de examinar a existência de uma relação significativa de dependência entre duas ou mais variáveis, fundamentando-se tanto em representações gráficas quanto em fundamentos matemáticos.

Sendo assim, com o propósito de simplificar a avaliação estatística das medidas de deflexão, procedeu-se ao cálculo dos valores médios ($D_{méd}$), máximos ($D_{máx}$) e mínimos ($D_{mín}$), bem como do desvio padrão (DP).

Neste estudo, foram obtidos, com auxílio do MS Excel, os modelos de regressão simples, linear e não linear, conforme a seguir:

$$\text{Linear: } Y = \alpha X + \beta \quad (1)$$

$$\text{Exponencial: } Y = \alpha e^{\beta X} \quad (2)$$

$$\text{Potencial: } Y = \alpha X^{\beta} \quad (3)$$

$$\text{Log.: } Y = \alpha \ln(X) + \beta \quad (4)$$

em que:

Y: valor a ser estimado (variável dependente);

X: variável independente;

, α , β : coeficientes da equação.

O valor dependente (Y) será representado pela deflexão medida com o LWD e o independente (X) pela deflexão medida na VB.

Uma vez obtido o modelo de regressão, será possível gerar o coeficiente de determinação (R^2), que irá representar percentualmente o quanto de dados de uma variável dependente podem ser explicados a partir da variável independente, ou seja quantas leituras feitas com o LWD podem ser explicadas por leituras feitas com viga Benkelman.

O valor de R^2 pode variar de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, mais o modelo de regressão possui uma curva que se ajusta bem aos dados, sendo esse o fator que determinará qual o melhor modelo dentre o linear e os não lineares.

Caso vez que haja uma regressão linear como modelo mais significativo de acordo com o seu coeficiente de correlação (R^2), é possível obter também o Coeficiente de Correlação, que indicará o quão relacionável uma medição será da outra estatisticamente, ou seja, o grau da relação entre as deflexões aferidas pela viga Benkelman e as aferidas com LWD.



DOI: [10.29327/1430212.49-2](https://doi.org/10.29327/1430212.49-2)

CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DEFLECTOMÉTRICOS OBTIDOS COM VIGA BENKELMAN E DEFLECTÔMETRO DE PESO LEVE (LWD):
ESTUDO DE CASO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PAVIMENTO

O valor do coeficiente pode ser negativo ou positivo e variar de 0 a 1, de acordo com a tabela 3 a seguir:

Tabela 3. Interpretação para o valor do coeficiente de correlação de Pearson (ρ)

Valor de ρ (Positivo ou negativo)	Interpretação
0,00 a 0,19	Correlação muito fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

O valor de ρ foi calculado e obtido com auxílio do software MS Excel.

Com o objetivo de eliminar possíveis dados incorretos que possam ter sido resultado de uma coleta inadequada, foi aplicado um procedimento de tratamento para identificar as medições que sejam atípicas ou discrepantes, as quais poderiam distorcer os resultados das análises estatísticas.

Para realizar esse tratamento, foi empregado o método da Amplitude Interquartil (IQR), onde o qual é calculado por meio do MS Excel, utilizando a seguinte fórmula:

$$L = Dméd \pm 1,5 (Q3 - Q1) \quad (5)$$

em que:

L: Limites aceitáveis de deflexão;

$Dméd$: Deflexão média;

Q1: Quartil 1;

Q3: Quartil 3.

Caso identificados dados espúrios, que ultrapassam os limites estabelecidos, essas observações serão excluídas do conjunto de dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados dos Ensaio de Campo

No trecho 1, observando as leituras deflectométricas da VB, é possível notar uma dispersão moderada em torno do valor médio, desvio padrão se mantendo em cerca de 30%, com deflexões variando entre 1,482 mm e 0,561 mm e valor médio de 1,102 mm. As leituras do LWD possuíram uma dispersão também moderada em relação à média, com o desvio padrão de 0,08, possuindo valor máximo de 0,416 mm e mínimo de 0,198 mm, além de uma média de 0,310 mm.



No trecho 2, a deflexão média detectada a partir da viga Benkelman foi de 0,653 mm, com valor máximo de 1,042 mm, mínimo de 0,140 mm e desvio padrão foi de 0,26. Já para o ensaio com LWD foi obtida a deflexão média de 0,321 mm, máxima de 0,391 mm e mínima de 0,272 mm.

Ao ser ensaiado, o trecho 3 apresentou valores de deflexão menores comparados aos obtidos em Pernambuco, com uma dispersão em relação à média também menor. Para a viga Benkelman, foi vista leitura máxima de 0,461 mm e mínima de 0,100, possuindo média de 0,300 mm e desvio padrão de 0,07 mm. No LWD verificou-se valor máximo de 0,287, mínimo de 0,179, médio de 0,225 e desvio padrão de 0,03 mm.

Por fim, as deflexões aferidas com a VB no trecho 4, apresentaram valor médio de 0,280 mm com desvio padrão de 0,09 mm, sendo o maior 0,421 mm e o menor 0,120 mm. Já no LWD temos deflexão média de 0,433, com desvio padrão de 0,09, possuindo deflexões máximas e mínimas de 0,599 mm e 0,264 respectivamente.

Diante do exposto, no que diz respeito aos segmentos 1, 2 e 3, as deflexões obtidas por meio da viga Benkelman sempre se mostraram superiores. No entanto, no segmento 4, observou-se um comportamento contrário, no qual as deflexões obtidas com o equipamento LWD apresentaram valores mais elevados.

Em uma análise global dos achados dessa pesquisa (Figura 3), ao considerar todos os pontos de forma empírica, não foi possível identificar matematicamente, um padrão claro entre as medidas de deflexão, nem uma proporção bem definida. Todavia, na seção das conclusões, serão abordadas possíveis causas geradoras desses resultados apresentados.

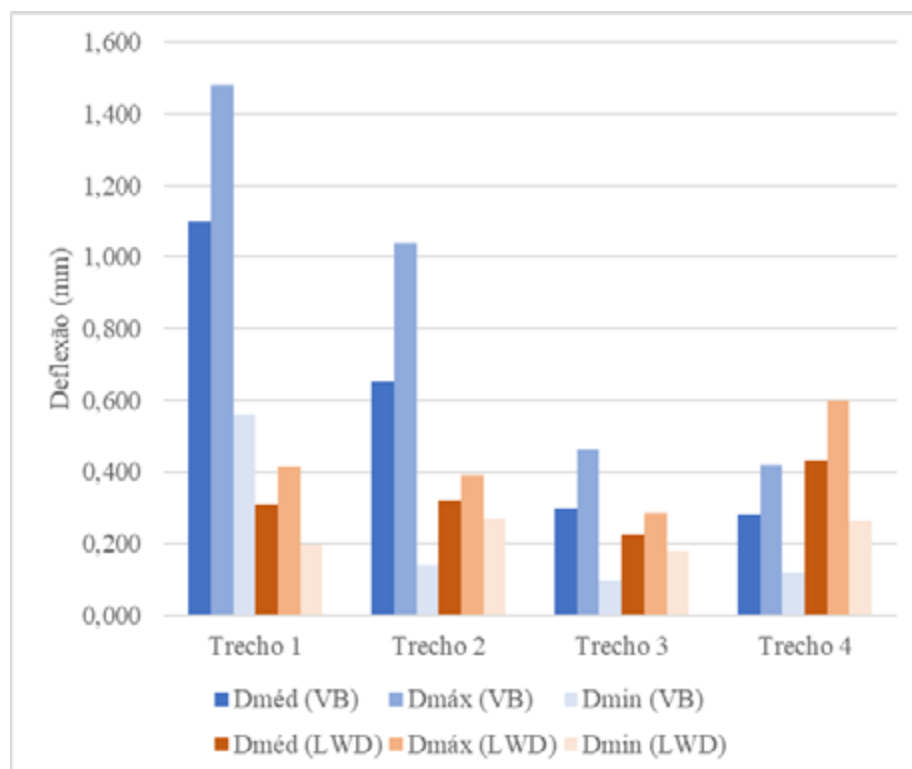


Figura 3. Gráfico resumo de dados deflectométricos de todos os trechos (AUTORES, 2023)



DOI: 10.29327/1430212.49-2

CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DEFLECTOMÉTRICOS OBTIDOS COM VIGA BENKELMAN E DEFLECTÔMETRO DE PESO LEVE (LWD):
ESTUDO DE CASO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PAVIMENTO

Dados das Análises Estatísticas

Nos segmentos 1, 2 e 4, apresentados nas tabelas 4, 5 e 7 respectivamente, nenhum modelo de regressão foi capaz de estabelecer uma correlação satisfatória, uma vez que os coeficientes de determinação calculados permanecem abaixo de 0,1. Esses coeficientes indicam que as curvas não se ajustam adequadamente aos dados dispersos, sendo menos de 1% das leituras de LWD podendo ser explicadas por leituras feitas com viga Benkelman. Os coeficientes de Pearson observados nos modelos lineares apresentam uma correlação linear classificada como muito fraca, tão próxima de zero que se pode inferir nula.

No segmento 3 (Tabela 6) é perceptível a presença de correlações ligeiramente mais definidas, conforme indicado pelos modelos que demonstram que mais de 10% das leituras realizadas com o equipamento LWD podem ser explicadas pelas leituras obtidas com a viga Benkelman.

Tabela 4. Modelos de regressão e Coeficiente de determinação do trecho 1 (AUTORES, 2023)

Tipo do Modelo	Modelo	R ²	ρ	Interpretação
Linear	$Y = -0,0166X + 0,3286$	0,06	0,07	Correlação linear muito fraca
Exponencial	$Y = 0,318e^{0,052X}$	0,06	-	-
Potencial	$Y = 0,3004X^{0,011}$	0,004	-	-
Logarítmica	$Y = -0,004 \cdot \ln(X) + 0,3105$	0,004	-	-

Tabela 5. Modelos de regressão e Coeficiente de determinação do trecho 2 (AUTORES, 2023)

Tipo do Modelo	Modelo	R ²	ρ	Interpretação
Linear	$Y = 0,0087X + 0,3151$	0,004	0,06	Correlação linear muito fraca
Exponencial	$Y = 0,3136e^{0,0237X}$	0,004	-	-
Potencial	$Y = 0,318X^{0,003}$	0,00	-	-
Logarítmica	$Y = -3 \cdot 10^{-5} \cdot \ln(X) + 0,321$	0,00	-	-

Tabela 6. Modelos de regressão e Coeficiente de determinação do trecho 3 (AUTORES, 2023)

Tipo do Modelo	Modelo	R ²	ρ	Interpretação
Linear	$Y = 0,1544X + 0,1832$	0,12	0,35	Correlação linear fraca
Exponencial	$Y = 0,1836e^{0,7081X}$	0,11	-	-
Potencial	$Y = 0,2865X^{0,1863}$	0,15	-	-
Logarítmica	$Y = 0,0409 \cdot \ln(X) + 0,2805$	0,16	-	-

Tabela 7. Modelos de regressão e Coeficiente de determinação do trecho 4 (AUTORES, 2023)

Tipo do Modelo	Modelo	R ²	ρ	Interpretação
Linear	$Y = 0,0642X + 0,4418$	0,004	0,07	Correlação linear muito fraca
Exponencial	$Y = 0,4411e^{0,0612X}$	0,004	-	-
Potencial	$Y = 0,4538X^{0,039}$	0,003	-	-
Logarítmica	$Y = 0,0133 \cdot \ln(X) + 0,4773$	0,003	-	-



Todavia, dentre os modelos estudados contidos nas tabelas apresentadas, e gerados no MS Excel, o que apresentou o melhor coeficiente de determinação foi o logarítmico, com um valor de R^2 de 0,16, embora não tenha se destacado significativamente em relação aos demais modelos. O coeficiente de Pearson de 0,35 evidenciou uma correlação fraca para o modelo linear.

Sendo assim, a equação observada por esse estudo que possui o maior potencial para explicar a relação entre deflexões aferidas com VB e LWD é:

$$Y = 0,0409.ln(X) + 0,2805 \quad (6)$$

em que:

Y: Deflexão medida com o LDW (Variável dependente);

X: Deflexão medida com a Viga Benkelman (Variável independente).

CONCLUSÃO, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Esta pesquisa tentou correlacionar dados deflectométricos medidos com dois equipamentos diferentes, o Deflectômetro de peso leve (LWD) e a viga Benkelman, com o intuito de poder usar as deflexões aferidas com o LWD convertidas como parâmetro de entrada em métodos de dimensionamento de reforço de pavimento, que hoje utilizam leituras da VB em suas metodologias de projeto.

Após analisar dados levantados por ensaios realizados em quatro trechos localizados em duas cidades diferentes do Nordeste brasileiro, não foi possível estabelecer uma correlação válida entre os dois equipamentos, visto que os trechos (1, 2 e 4) estudados não apresentaram correlação e o trecho 3 apresentou correlação fraca.

Dado o cunho experimental desta pesquisa, o presente estudo de caso se propôs a analisar e observar os resultados viáveis mediante as aferições ao longo de pequenos trechos de vias urbanas. Entretanto, como apresenta-se na literatura, a ausência de informações referentes a caracterização dos materiais constituintes dos pavimentos submetidos aos ensaios, bem como a disposição das camadas estruturantes subjacentes, tampouco a delimitação de segmentos de características homogêneas, podem ter contribuído para a ausência de correlações válidas entre as medições de deflexões obtidas nesta pesquisa.

Ainda no contexto da sensibilidade da análise em questão, é necessário pontuar que a falta de controle do afastamento entre os equipamentos de LWD e VB durante a realização dos ensaios lado a lado, podem ter interferido ou influenciado na medição das deflexões, uma vez que o Deflectômetro de Peso Leve, poderia estar dentro da área de influência da carga apresentada pelo eixo do caminhão.

Ademais, a utilização do Deflectômetro de peso leve, sem o emprego do pistão de aço temperado, em detrimento da placa de carga convencional, como sugerido por alguns pesquisadores, pode não ter induzido uma deformação mensurável na superfície do pavimento asfáltico necessária para aferir deflexões em estruturas asfálticas.

A análise relatada neste estudo pode oferecer contribuições a estudos futuros, destacando a importância de seguir as recomendações da literatura ao se procurar discernir interdependências entre dados deflectométricos obtidos por distintos equipamentos. A esse respeito, é possível recomendar os seguintes parâmetros:



DOI: [10.29327/1430212.49-2](https://doi.org/10.29327/1430212.49-2)

CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DEFLECTOMÉTRICOS OBTIDOS COM VIGA BENKELMAN E DEFLECTÔMETRO DE PESO LEVE (LWD): ESTUDO DE CASO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO PAVIMENTO

- I. Análise caso a caso, visto que os modelos de correlação carecem de generalidade;
- II. Condução dos ensaios em condições idênticas de umidade e temperatura;
- III. Amostragem representativa e abrangente;
- IV. Conhecimento das espessuras da estrutura do pavimento, uma vez que isso afeta o módulo de resiliência e pode afetar também o desempenho do equipamento LWD;
- V. Avaliação de outras características estruturais do pavimento, como composição do material, condições do subleito e ocorrência de manifestações patológicas;
- VI. Investigação de pontos localizados em trechos homogêneos, isto é, que compartilham semelhanças;
- VII. Ensaios com diferentes equipamentos devem ser realizados próximos ao ponto escolhido para análise, havendo a garantia de que uma estrutura de mesma característica está sendo estudada, mas não devem ser feitos ao mesmo tempo, evitando interferências nas leituras de deflexão.

Sugere-se a realização de pesquisas que avaliem a aplicabilidade e desempenho de equipamentos de LWD em estruturas de pavimento com várias camadas, e o estudo de correlação entre deflexões medidas com LWD e VB aferidas em apenas uma camada da estrutura, de forma a avaliar a significância de avaliar de forma isolada apenas um elemento estrutural durante o processo de controle tecnológico da construção de uma via.

REFERENCIAS

ASTM (2015) E2835-11 - Standard test method for measuring deflections using a portable impulse plate load test device. American Society for Testing and Materials

Beninca, G. P.; Santos, A. G. (2021). Avaliação estrutural de pavimentos urbanos revestidos por concreto asfáltico sobre camada de paralelepípedos a partir de ensaios deflectométricos. 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, s.l.

Borges, C. B. S. (2001). Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2022). Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: ABEDA, 2ª ed., 2022.

DNIT – IPR 719 (2006). Manual de Restauração de pavimentos asfálticos. 3.ed. Rio de Janeiro.

DNIT (2010) ME 133/2010 - Pavimentação asfáltica - delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman: método de ensaio. Rio de Janeiro.

Lopes, L. F. D. (2003). Apostila de Estatística. Santa Maria: UFMS. 2003.

Magalhães, M. N.; Lima, A. C. P. Noções de probabilidade e estatística. 4. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

Martello, V. G.; Garcez, M. G. (2022). Comparação de deflexões obtidas por meio de equipamentos LWD e viga Benkelman. XXXIV Salão de Iniciação Científica da UFRGS, Porto Alegre, RS.



Medina, J.; Motta, L. M. G. (2015). Mecânica dos Pavimentos. São Paulo: Editora Interciência, 3ª ed., 2015.

Nery, C. C. Z.; Santos, A. G. (2022). Comparativo entre deflexões com a viga benkelman, fwd e lwd na avaliação estrutural de uma rodovia catarinense. 36º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Fortaleza, CE.

Oliveira, A.; Pitta, D.; M. Trichês, G. (2000). Avaliação do comportamento mecânico da camada de lastro de pedra pulmão empregada no lote 8 da duplicação da br-101. Reunião Anual de Pavimentação: 2º Seminário Nacional de Modernas Técnicas Rodoviárias., Florianópolis, 2000.

Reis, M.; Lino, M. Introdução e Análise Exploratória de Dados. [S. l.: s. n.], 2023.

Rodrigues, T. N. (2017). Estudo comparativo do CBR “in situ” & lwd para determinação da capacidade de suporte de subleitos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Rodrigues, P. R. (2018). Medidas de deflexão em pavimentos asfálticos urbanos com o deflectômetro de peso leve. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC.

SANTANA, Cinthia Isabelle Alves; SÁ, Renner Freire Aguiar. Ensaios não destrutivos em pavimentos pelo método FWD, análise estrutural comparativa entre as faixas da Av. Arthur Lima Cavalcanti, Santo Amaro, Recife, PE. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - CTG, Universidade Federal de Pernambuco, [S. l.], 2012.

Velasco, B. Q. (2018) Análise crítica do controle construtivo de pavimentos com a viga de Benkelman: aplicação ao caso da ampliação do Aeroporto Internacional Tom Jobim no Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Zorn Instruments (2021). Asphalt Tester: Modified Light Weigh Deflectometer. [S. l.: s. n.], 2021.



Uma Análise da Malha Rodoviária Federal Brasileira usando parâmetros obtidos com o ensaio FWD.

Bruno Marques de Castro¹; Victor Hugo Dalostro de Oliveira¹; Emerson Aparecido de Anhaia¹; Victor Leandro Chaves Garcia¹; Giulia Araújo Carvalho¹

RESUMO

O artigo tem como objetivo avaliar a condição estrutural da malha rodoviária federal sob administração do DNIT, fazendo o uso apenas de parâmetros obtidos com o ensaio não destrutivo do levantamento deflectométrico do FWD. Foram avaliados os resultados dos levantamentos de pavimento flexível levantados nos anos de 2020, 2021 e 2022, compreendendo a uma extensão de 53.292,8 km, equivalente a 266.464 pontos de ensaios espaçados a cada 200 metros. O artigo propõe uma análise da malha utilizando a norma DNER PRO-11/79 e o método proposto por Horak (2008), permitindo-se classificar a condição estrutural das rodovias, fazendo-se uma análise geral, regional e por estado. Os resultados indicaram que o cálculo com Horak apresentou resultados semelhantes aos da norma DNER PRO-11/79, onde foi encontrado que aproximadamente 19% da malha total analisada está em um estado classificado como Severo. A análise regional mostrou que o Nordeste tem o melhor desempenho estrutural, com 47% da malha no estado Seguro, enquanto a região do Norte tem a pior classificação, possuindo cerca de 39% de sua malha em um estado Severo. A análise individual dos parâmetros revelou que as camadas inferiores do pavimento, como a base e o sub-leito, possuem resultados melhores de desempenho do que as camadas mais superiores, como a camada de revestimento. Conclui-se que a avaliação de desempenho de pavimentos é uma tarefa complexa e que requer a análise de muitos parâmetros, tornando importante a realização regular de avaliações para identificar possíveis problemas e implementar medidas preventivas de manutenção, garantindo a segurança dos usuários das rodovias e a eficiência do transporte rodoviário como um todo.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento; Deflexão; FWD.

ABSTRACT

The article aims to evaluate the structural condition of the federal road network under the DNIT administration, using only parameters obtained from the non-destructive FWD deflection survey. The flexible pavement surveys carried out in 2020, 2021, and 2022 were evaluated, covering a length of 53,292.8 km, equivalent to 266,464 FWD test points spaced every 200 meters. The article proposes an analysis of the network using the DNER PRO-11/79 standard and the method proposed by Horak (2008), allowing the classification of the structural condition of the roads, through a general, regional, and state-by-state analysis. The results indicated that the calculation with Horak presented similar results to those of the DNER PRO-11/79, where it was found that approximately 19% of the total network analyzed is in a state classified as Severe. The regional analysis showed that the Northeast has the best structural performance, with 47% of the network in a Safe state, while the North region has the worst classification, with about 39% of its network in a Severe state. The individual parameter analysis revealed that the lower pavement layers, such as the base and subgrade, have better performance results than the upper layers. It is concluded that pavement performance evaluation is a complex task that requires analysis of many parameters, making regular evaluations important to identify possible problems and implement preventive maintenance measures, ensuring the safety of road users and the efficiency of road transportation.

KEY WORDS: Pavement; Deflection; FWD.

¹ ENGEFOTO Engenharia e Aerolevantamentos S.A., e-mails: bmcastroo@gmail.com



1 - INTRODUÇÃO

O desempenho da rodovia é um dos fatores principais que garantem a segurança e o conforto dos usuários, além de desempenhar um papel fundamental na economia do país. Uma das formas de se avaliar esse desempenho é através da análise da condição estrutural do pavimento.

Entre as técnicas não destrutivas e eficientes para se avaliar a condição estrutural do pavimento, destaca-se o ensaio de deflexão pela queda de um peso, o *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Esse é um ensaio já bem estabelecido mundialmente, e que fornece resultados valiosos para análises estruturais dos pavimentos (Horak e Emery, 2023).

O ensaio do FWD tenta simular o pavimento sob o efeito de tráfego de veículos em movimento, através da queda e impacto de um objeto sobre um sistema, a partir de uma altura pré-determinada, transferindo a força aplicada para uma placa apoiada no pavimento e medindo-se a deflexão pela recuperação elástica desse impacto. (DNER PRO-273, 1996).

Essa técnica é essencial para monitorar a capacidade de suporte e a durabilidade do pavimento, permitindo-se uma análise das necessidades de manutenção e reparo, garantindo, assim, uma gestão mais eficiente e econômica das rodovias

Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo analisar a condição estrutural dos pavimentos flexíveis de toda a malha rodoviária federal sob administração do DNIT, usando os resultados dos levantamentos deflectométrico realizado nos anos de 2020, 2021 e 2022, seguindo a norma de procedimentos de ensaio para o FWD no DNIT, a DNER PRO-273/96.

No entanto, o artigo propõe-se a analisar apenas o comportamento estrutural dos pavimentos. São avaliados parâmetros como as deflexões, o raio de curvatura e o tipo de pavimento utilizado. Com isso, são apresentados vários índices que permitem aferir o desempenho das bacias de deflexões de toda a malha.

2 - METODOLOGIA

Nos anos de 2020, 2021 e 2022, foi realizada uma campanha de levantamento deflectométrico em toda a malha rodoviária federal sob a administração do DNIT, utilizando os procedimentos descritos na norma rodoviária DNER PRO-273/96.

O ensaio foi realizado em todo pavimento flexível da malha, ensaiando pontos a cada 200 metros, resultando em uma extensão total de 53.292,8 km ensaiada, o que equivale a 266.464 pontos FWD. A carga aplicada no ensaio foi de 40 kN, de forma distribuída em uma placa de 30 cm de diâmetro, por um tempo aproximado de 2 centésimos de segundo, permitindo-se a leitura simultânea dos assentamentos reversíveis em sete pontos, situados sob as distâncias do centro de aplicação conforme apresentado na Tabela 1.

Sensores / Geofone	D_0	D_{20}	D_{30}	D_{45}	D_{65}	D_{90}	D_{120}
Distância (mm)	0	200	300	450	650	900	1200



DOI: [10.29327/1430212.49-5](https://doi.org/10.29327/1430212.49-5)

UMA ANÁLISE DA MALHA RODOVIÁRIA FEDERAL BRASILEIRA
USANDO PARÂMETROS OBTIDOS COM O ENSAIO FWD

Tabela 1 Posicionamento dos sensores de deflexão

2.1 – Parâmetros analisados

Os parâmetros que serão analisados estão apresentados nos itens a seguir.

2.1.1 – Índice da Curvatura da Superfície (SCI)

O parâmetro **SCI** (*Surface Curvature Index*) é utilizado como um indicativo da resistência das camadas superiores do pavimento. É calculado com a Equação 1 como a diferença entre as deflexões no ponto de aplicação da carga (D_0) e a deflexão a 30 cm da aplicação da carga (D_{30}). Valores de SCI superiores a $25 \cdot 10^{-2}$ mm estão geralmente associados a camadas superiores do pavimento pouco resistentes ou de pequenas espessuras com acentuado arqueamento da bacia.

$$SCI = D_0 - D_{30} \quad (1)$$

O valor do **SCI** é inversamente proporcional à rigidez global do pavimento podendo indicar se as causas das deficiências num pavimento podem ser atribuídas às camadas de revestimento e base.

2.1.2 – Índice de Danos à Base (BDI)

O **BDI** (*Base Damage Index*) é um indicador da condição para a camada de base do pavimento, sendo calculado com a Equação 2 como a diferença entre as deflexões a 30 cm (D_{30}) e 60 cm (D_{60}) de distância do ponto de aplicação da carga, sendo medido geralmente em 10^{-2} mm.

$$BDI = D_{30} - D_{60} \quad (2)$$

Os valores de **BDI** diminuem com o aumento da espessura equivalente do pavimento analisado. Valores acima de $40 \cdot 10^{-2}$ mm podem indicar pavimentos pouco resistentes ou com problemas, sendo considerado um dos melhores indicadores da condição da camada de base do pavimento, geralmente também sendo utilizado para avaliar a resistência da estrutura do pavimento.

2.1.3 – Índice da Curvatura da Base (BCI)

O parâmetro **BCI** (*Base Curvature Index*) é calculado com a Equação 3 como sendo a diferença entre as deflexões a 60 cm (D_{60}) e 90 cm (D_{90}) do ponto de aplicação da carga, medido em 10^{-2} mm. Este parâmetro é apresentado como o melhor indicador da condição do subleito.

$$BCI = D_{60} - D_{90} \quad (3)$$

O **BCI** é inversamente proporcional ao CBR, sendo que valores menores indicam maiores resistências. O valor do **BCI** varia pouco durante a vida do pavimento e está associado a valores de CBR próximos a 10% ou menores. Pode ser usado no diagnóstico de comportamento de um



pavimento para identificar se as deficiências são atribuídas a todas as camadas ou especificamente ao subleito. O limite para o BCI é de $10 \cdot 10^{-2}$ mm

2.1.3 – Raio de Curvatura (R_c)

O Raio de curvatura (R_c) é um parâmetro importante para analisar a bacia de deflexão do ensaio. O cálculo é realizado conforme a Equação 4, assumindo a deformação por uma parábola do 2º grau, com origem no ponto aplicação de carga (D_0) até um ponto de referência crítico a 25 cm (D_{25}).

$$R_c = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})} \quad (4)$$

Devido ao fato dos ensaios realizados pelo DNIT ter os Geofone a 20cm e a 30cm do eixo, e nenhum a 25 cm, o cálculo de D_{25} é obtido por meio de interpolação.

A Figura 2 apresenta uma ilustração da bacia de deflexão e os parâmetros analisados.

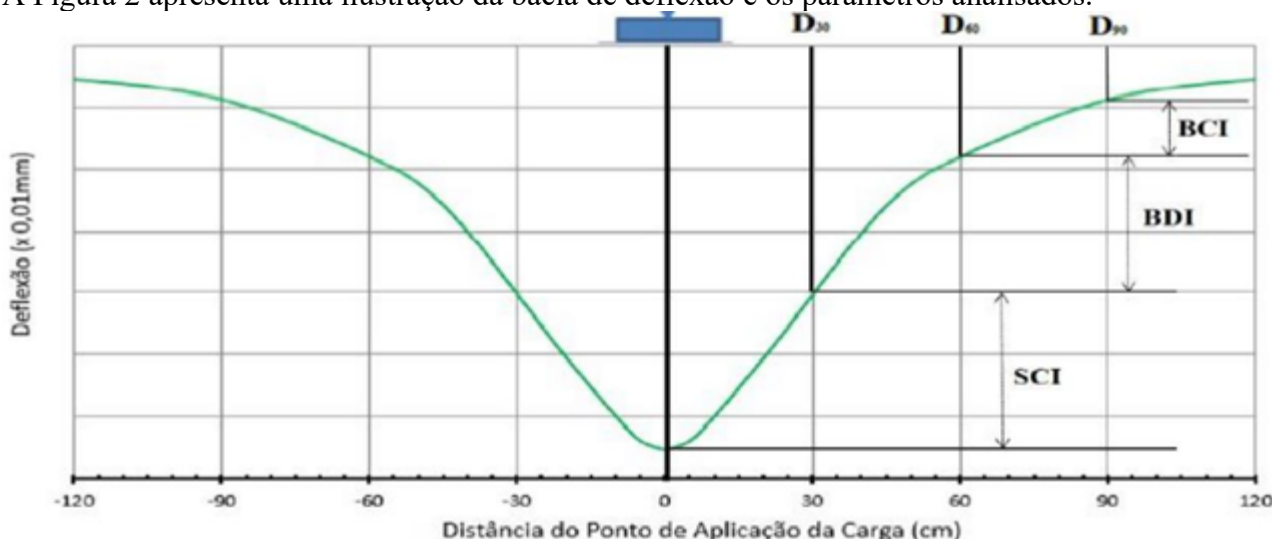


Figura 2 – Representação gráfica dos parâmetros analisados

2.2 – Critérios de classificação

A DNER PRO-11/79 permite avaliar pavimentos baseando-se em critérios de deformabilidade. Segundo o item de avaliação estrutural, a norma propõe casos para avaliar a estrutura do pavimento, classificando-o em: “BOA”, “REGULAR”, “REGULAR PARA MÁ” ou “MÁ”.

Os cálculos dos critérios de avaliação necessitam de parâmetros como a deflexão de projeto (D_{adm}). Como o escopo desse artigo não abrange essa análise criteriosa, os cálculos irão avaliar apenas o Raio de Curvatura (R_c), permitindo classificar as rodovias em “Regular para MÁ” e “MÁ”, ou em uma classificação “Incerta”, que requer mais análises para uma classificação mais precisa.

Outras classificações são realizadas com os estudos apresentados por Horak (2008), que apresenta intervalos que correlacionam o nível de desempenho do pavimento com os parâmetros do FWD. Em seu artigo, Horak apresentou correlações para diferentes tipos de bases de pavimento. Considerando



DOI: 10.29327/1430212.49-5

UMA ANÁLISE DA MALHA RODOVIÁRIA FEDERAL BRASILEIRA
USANDO PARÂMETROS OBTIDOS COM O ENSAIO FWD

que o tipo de base granular é o material mais utilizado na execução da base no Brasil, os resultados das análises serão calculados para este tipo de material, conforme estão na Tabela 2.

Avaliação da condição estrutural (Horak, 2008)	Parâmetros de análise da bacia (10 ⁻² mm)				Avaliação da condição estrutural (DNER PRO)	Parâmetro analisado
	<i>D₀</i>	<i>SCI</i>	<i>R_c</i>	<i>BCI</i>		<i>R_c</i>
Seguro	< 50	< 20	< 10	< 5	Boa ou Regular	>= 100
Em alarme	50 – 75	20 – 40	10 – 20	5 – 10	Regular para má ou má	< 100
Severo	> 75	> 40	> 20	> 10		

Tabela 2 – Avaliação da condição estrutural de pavimentos flexíveis segundo parâmetros do FWD

3 - RESULTADOS

O Gráfico 1 apresentado a seguir mostra um resumo da classificação da malha rodoviária federal, através dos parâmetros analisados e dividindo-os segundo o seu nível de severidade.

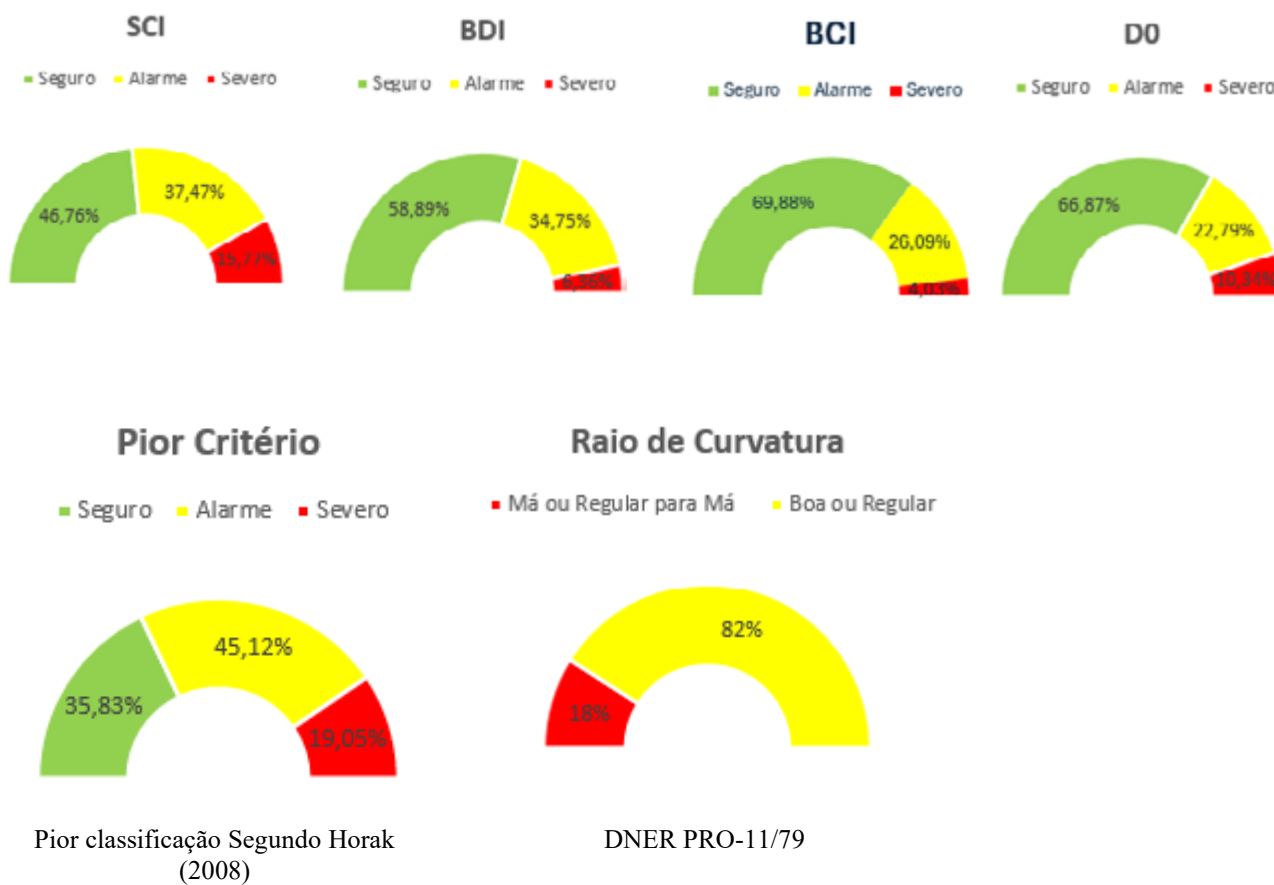


Gráfico 1 – Classificação geral da malha rodoviária federal.



BRUNO MARQUES DE CASTRO,
EMERSON APARECIDO DE ANHAIA, VICTOR LEANDRO CHAVES GARCIA,
GIULIA ARAÚJO CARVALHO, VICTOR HUGO DALOSTRO DE OLIVEIRA

Analisando as classificações, foi encontrado segundo o pior critério encontrado com Horak (2008), que cerca de 19% da malha está em condições **Severa**, 45% **Em alarme** e 36% **Seguro**.

Analisando a malha segundo a DNER PRO-11/79, foi encontrado que cerca de 18% da malha está em condições **Regular para má ou má**, próximo ao resultado encontrado com Horak (2008). Porém, foi verificado que 82% da malha não pode ser classificada somente com esse parâmetro, e que, portanto, precisaria de análises que envolvam as solicitações com o eixo padrão de 8,2t (*n*).

Ao avaliar individualmente os parâmetros, podemos tirar algumas conclusões a respeito da influência das camadas do pavimento na classificação de desempenho estrutural.

Pode-se verificar que os parâmetros **BDI** e **BCI**, que avaliam as camadas inferiores do pavimento, como a base e o subleito, respectivamente, tiveram menores percentuais com um estado **Severo** do que o índice **SCI** que avalia as camadas superiores do pavimento, como o revestimento. Enquanto o **SCI** apontou que 16% da malha está em um estado **Severo**, os parâmetros **BDI** e **BCI** apontaram apenas valores de 6% e 4%, respectivamente.

Verifica-se então que o parâmetro **SCI**, da camada superior do pavimento, é a maior responsável pela classificação do estado **Severo**, sendo responsável por 83% das classificações nesse estado. Ou seja, caso fosse desconsiderado esse parâmetro na classificação, a malha passaria a ter apenas 13% de sua malha ao invés de 19% no estado **Severo**, e subiria na avaliação de 36% para 48% da malha como **Seguro**, um aumento de 6.657,4 km.

Analisando o parâmetro **BDI**, que avalia a camada de revestimento da superfície do pavimento, nota-se uma concordância com os resultados de Índice de Condição de Superfície (ICS) que estão apresentados em outro artigo nesse congresso, onde foram encontrados para essa malha analisada, 29% da malha em condição ótima, 14% em condição boa, 28% regular, 22% ruim, e 7% péssima. Nota-se uma equivalência na avaliação péssima com os 6% encontrado como severo com o **BDI**.

Analisando o **BCI**, é possível avaliar que 70% da malha rodoviária foi classificada como **Seguro**, indicando que os problemas podem não ser das camadas inferiores do leito, ou de todo o pavimento. Nota-se que apenas 4% da malha foi classificada como **Severo** segundo esse parâmetro.

A Tabela 3 traz um resumo das classificações segundo Horak (2008) e a norma DNER PRO-11/79.

Região	Extensão analisada (km)	DNER PRO-11/79		Classificação segundo o pior critério de Horak (2008)					
		Regular para má ou má		Severo		Em alarme		Seguro	
		(km)	%	(km)	%	(km)	%	(km)	%
Norte	9556.2	4090.6	43%	3771.4	39%	4151.2	43%	1633.6	17%
Nordeste	18714.8	2465.0	13%	2430.8	13%	7449.4	40%	8834.6	47%
Centro-Oeste	8608.2	1560.2	18%	1383.6	16%	4162.4	48%	3062.2	36%



DOI: 10.29327/1430212.49-5

UMA ANÁLISE DA MALHA RODOVIÁRIA FEDERAL BRASILEIRA
USANDO PARÂMETROS OBTIDOS COM O ENSAIO FWD

Sudeste	6744.4	781.4	12%	1385.0	21%	3297.2	49%	2062.2	31%
Sul	9669.2	741.8	8%	1180.8	12%	4983.8	52%	3504.6	36%
Total	53292.8	9639.0	18.09%	10151.6	19.0%	24044.0	45%	19097.2	35.8%

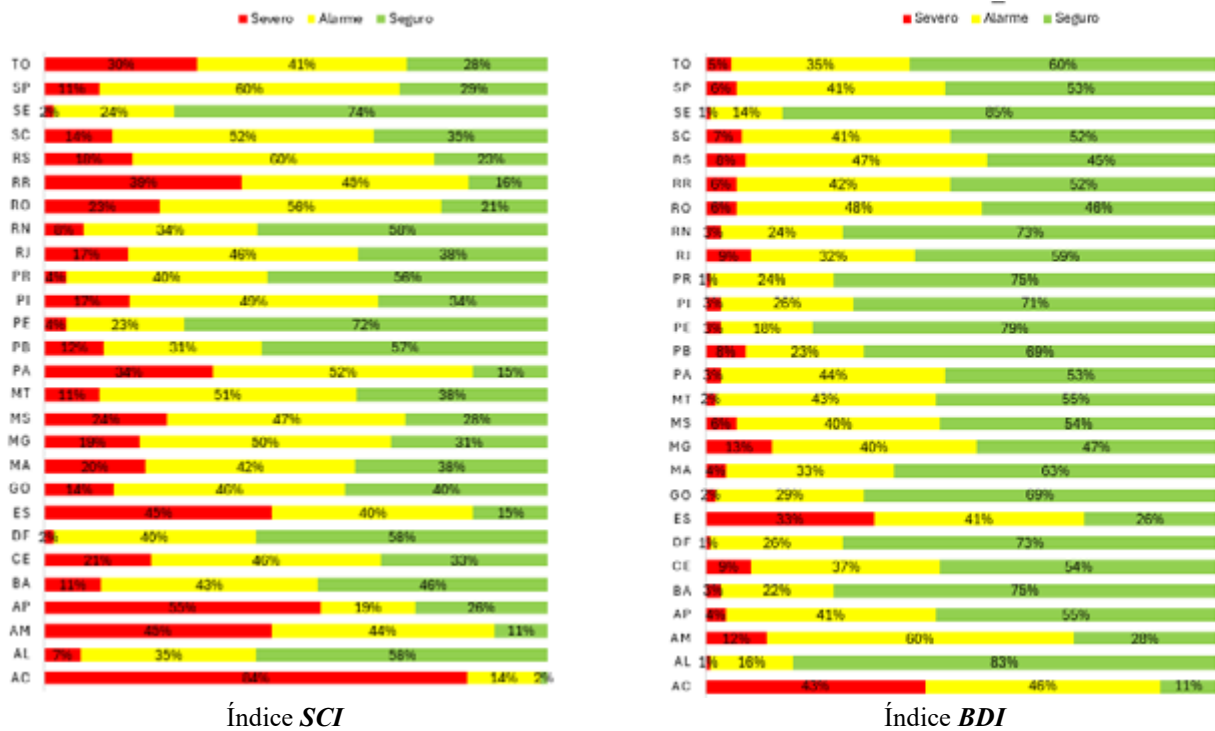
Tabela 3 – Classificação da malha segundo Horak (2008) por região.

O Nordeste além de ter a maior malha, possui o maior percentual classificado como **Seguro**. Possuindo um quantitativo total de 35% da malha federal, cerca de 47% dela está classificado na melhor classificação qualitativa.

O Sul tem a menor extensão na pior classificação e é a segunda maior malha no estado **Seguro**. Cabe ressaltar que essa região tem a segunda maior malha federal do Brasil e representa 18% da malha total que foi analisada.

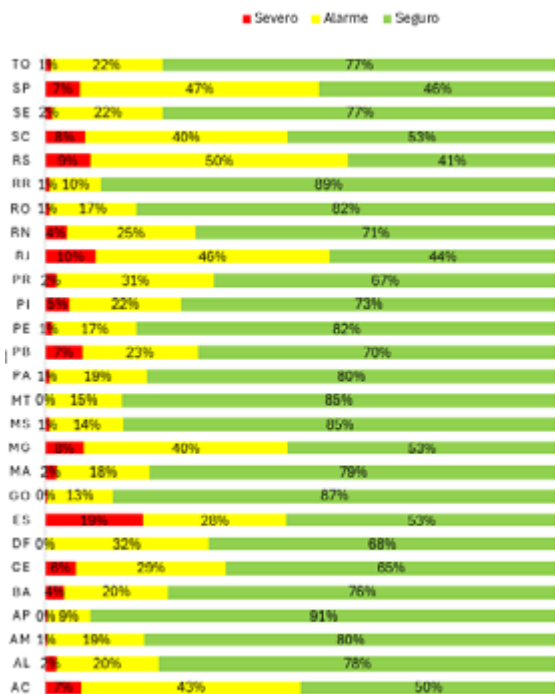
O Norte tem a maior extensão na pior classificação e a menor extensão na classificação **Segura**. Enquanto 39% e 43% de sua malha é classificada como **Severo** e **Regular para má ou má**, respectivamente, as outras regiões têm índice inferiores a 21% com Horak e 18% pela DNER PRO. Esse resultado indica uma desproporção, onde apesar do Norte possuir apenas 18% da malha total, tem quase a metade da contribuição no quantitativo total da malha nesse estado **Ruim**.

O Gráfico 2 a seguir traz um resumo das análises classificatórias por unidade federativa do Brasil.

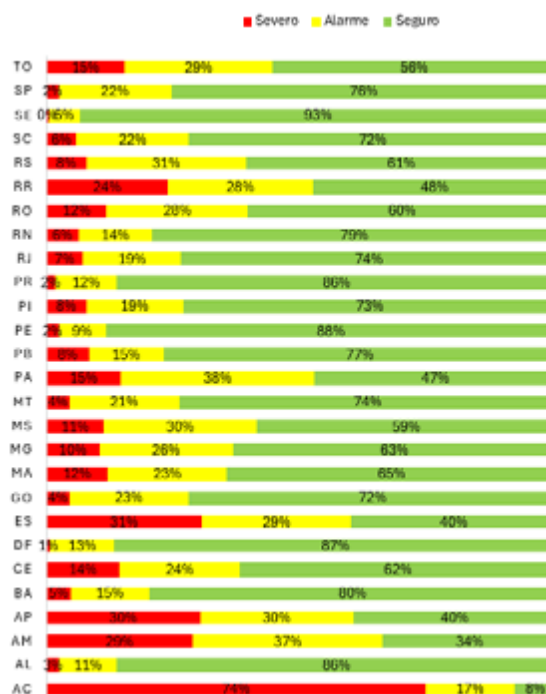




BRUNO MARQUES DE CASTRO,
EMERSON APARECIDO DE ANHAIA, VICTOR LEANDRO CHAVES GARCIA,
GIULIA ARAÚJO CARVALHO, VICTOR HUGO DALOSTRO DE OLIVEIRA



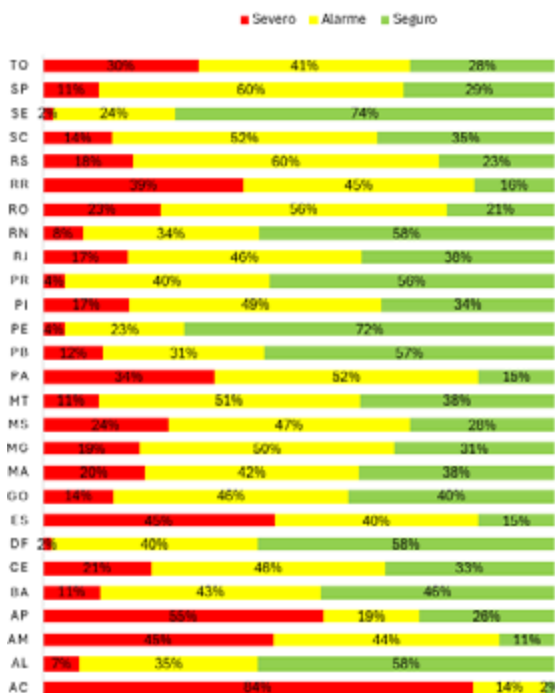
Índice BCI



Índice D0

Gráfico 2 – Classificação das rodovias segundo os parâmetros de Horak (2008).

O Gráfico 3 traz uma análise classificatória geral segundo Horak (2008) e a DNER PRO-11/79.



Pior classificação Segundo Horak (2008)



DNER PRO-11/79

Gráfico 3 – Classificação das rodovias segundo o pior critério de Horak (2008) e segundo a DNER PRO-11/79



DOI: [10.29327/1430212.49-5](https://doi.org/10.29327/1430212.49-5)

UMA ANÁLISE DA MALHA RODOVIÁRIA FEDERAL BRASILEIRA
USANDO PARÂMETROS OBTIDOS COM O ENSAIO FWD

As classificações apresentadas a seguir mostram que os estados com as melhores classificações foram DF, SE e PE, todos possuindo menos do que 5% de sua malha na pior condição.

Enquanto isso, o estado do AC apresentou mais de 84% de sua malha federal na pior classificação. Uma análise dos parâmetros mostra que o problema está associado a várias camadas do pavimento, pois os parâmetros D_0 , SCI e BDI deram 74%, 83% e 43% na condição **Severa**, respectivamente. Esse resultado indica que a possível causa dessa condição estrutural está associada a insuficiência a mais de uma camada do pavimento.

O segundo estado com a menor classificação é o AP, tendo até 55% da malha na pior classificação. Analisando os parâmetros, vemos que D_0 , SCI e BDI deram 30%, 55% e 4% na condição **Severa**, indicando que a possível causa dessa condição estrutural está associada a rigidez global do pavimento ou as camadas mais superficiais.

Os resultados revelam ainda que a classificação dos estados brasileiros é majoritariamente **Segura**, possuindo apenas 7 estados com uma extensão percentual acima de 30% classificada como **Severo**. Além disso, revelam que os resultados do AC e AP são desproporcionais pois são os únicos dois estados que possuem um valor percentual da malha acima de 50% na pior condição.

Essa classificação com o FWD está em concordância com as análises do ICS por estado de 2020, que também revelou que os estados de AL, PE, DF estão entre as melhores classificações, enquanto AC e ES estão entre as piores classificações.

4 - CONCLUSÃO

A comparação entre os critérios propostos neste artigo evidenciou que o método proposto por Horak (2008) apresentou resultados semelhantes aos da norma DNER PRO-11/79 para a pior condição de classificação. Apesar disso, é importante destacar que a DNER PRO-11/79 não foi capaz de classificar a maioria das amostras analisadas.

Uma análise geral dos resultados com Horak mostrou que a maioria das rodovias estão classificadas como **em alarme** (45%) ou **Seguro** (36%), enquanto 19% estão classificadas como **Severo**. Com a DNER PRO-11/79, cerca de 18% da malha é classificada como **regular para má ou má**.

A análise regional revelou que o Nordeste possui o melhor desempenho classificada como **Seguro**, seguido da região do Sul, que tem a menor extensão na pior classificação com os dois métodos. Por outro lado, o Norte tem a maior extensão com a pior classificação, apresentando uma desproporção significativa em relação às outras regiões do país.

A análise por estado mostrou variações significativas entre os estados brasileiros, com DF, SE e PE apresentando as melhores classificações e AC e AP com as piores avaliações de condição estrutural. A maioria dos estados foi classificada como **Segura**, no entanto, 7 estados possuem uma extensão percentual acima de 30% classificada como **Severo**.

A análise individual dos parâmetros revelou que o estado das camadas inferiores do pavimento, como a base e o subleito, teve resultados melhores do que as camadas superiores, como o revestimento.



BRUNO MARQUES DE CASTRO,
EMERSON APARECIDO DE ANHAIA, VICTOR LEANDRO CHAVES GARCIA,
GIULIA ARAÚJO CARVALHO, VICTOR HUGO DALOSTRO DE OLIVEIRA

Com base nos resultados apresentados nesse artigo, é possível concluir que a avaliação de desempenho de pavimentos é uma tarefa complexa e que requer a análise de muitos parâmetros. Portanto, apesar dos resultados técnicos que foram apresentados, muitos outros parâmetros ainda precisariam ser considerados para se chegar a conclusões mais assertivas a respeito da avaliação de desempenho estrutural do pavimento e de sua classificação qualitativa precisa.

É importante ressaltar que a avaliação do desempenho estrutural do pavimento é um processo contínuo e que os resultados devem ser regularmente revisados e atualizados. Como grande parte da extensão da malha está classificada como **em alarme**, fica evidente a necessidade de se manter um processo constante de avaliação do desempenho estrutural do pavimento.

Sendo assim, é crucial que avaliações sejam realizadas regularmente, permitindo identificar possíveis problemas o mais cedo possível, bem como fornecer parâmetros para a implementação de medidas preventivas de manutenção.

Dessa forma, é possível garantir a segurança dos usuários das rodovias e a eficiência do transporte rodoviário como um todo.



DOI: [10.29327/1430212.49-5](https://doi.org/10.29327/1430212.49-5)

UMA ANÁLISE DA MALHA RODOVIÁRIA FEDERAL BRASILEIRA
USANDO PARÂMETROS OBTIDOS COM O ENSAIO FWD

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO (1993). Guide for Pavement Structures. AASHTO, Washington, D.C., 1993

Association of Australian and New Zealand Roads. AUSTROADS (2008). Technical Basis of the Austroads Design procedures for flexible overlays on flexible pavements. Sydney, 2008

Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. DNER-ME 024/94. (1994). Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman, Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. DNER-PRO 011/1979. (1979). Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis, Rio de Janeiro: IPR. 1979.

_____. DNER-PRO 273/1996 (1996). Determinação de deflexão utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD). Rio de Janeiro: IPR. 1996

Fabício, J.M., Gonçalves, E.A. and Fabício, O.F., (1988). Metodologia não destrutiva para avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis através da interpretação das bacias de deformação. 23a Reunião Anual de Pavimentação, 3, pp.1415-1446.

Horak, E., 2008. Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 50(2), pp.2-9.

Horak, E., (1987). Aspects of deflection basin parameters used in a mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavements in South Africa. Tese (Philosophiae Doctor), University of Pretoria – 1987.

Horak, Emile; EMERY, Stephen. (2023). Falling weight deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavement structural evaluations. University of Pretoria. Kubu Australia Pty Ltd.



AVANÇOS TECNOLÓGICOS E CONTROLE DE QUALIDADE NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

Flaviane Beltrão Silva^{1,2}; Bruna Cristina Beltrão Silva Beleigoli^{1,2}; Anna Luiza Braga Amaral¹

RESUMO

Estradas com pavimentos deteriorados resultam em aumento dos custos operacionais, diminuição do conforto e segurança dos usuários, além de causar impactos ambientais negativos. Para garantir a qualidade, segurança e durabilidade das estradas, o controle tecnológico adequado é essencial. Este estudo investiga os avanços tecnológicos e os procedimentos de controle de qualidade na pavimentação asfáltica, e como o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais - DER-MG tem se movimentado nessas questões. Além disso, foram discutidos procedimentos de controle tecnológico, que incluem a medição da espessura do pavimento, determinação do teor de betume e análise granulométrica. A realização desses ensaios por profissionais qualificados e em conformidade com as normas estabelecidas é fundamental para garantir a equivalência com os requisitos do projeto e a qualidade das obras. As comparações demonstram a importância dos avanços tecnológicos no controle de qualidade da pavimentação asfáltica. Ao permitir uma análise detalhada e precisa dos materiais e condições das estradas, essas tecnologias contribuem para a construção de rodovias mais seguras, duráveis e sustentáveis. Em resumo, o investimento em planejamento, inovação, organização e controle tecnológico adequados é essencial para garantir a qualidade e segurança da infraestrutura rodoviária do país. Pode-se perceber que esses avanços tecnológicos estão transformando os processos relativos à pavimentação, incluindo o controle de qualidade.

PALAVRAS-CHAVE: Controle Tecnológico; Inovação; Pavimentação; Padronização.

ABSTRACT

Roads with deteriorated pavements result in increased operating costs, decreased comfort and safety for users, in addition to causing negative environmental impacts. To guarantee the quality, safety and durability of roads, adequate technological control is essential. This study investigates technological advances and quality control procedures in asphalt paving, and how the Department of Highways of the State of Minas Gerais - DER-MG has handled these issues. In addition, technological control procedures were discussed, which include measuring the thickness of the pavement, determining the bitumen content and granulometric analysis. Carrying out these tests by qualified professionals in accordance with established standards is essential to guarantee equivalence with project requirements and the quality of the works. The comparisons demonstrate the importance of technological advances in the quality control of asphalt paving. By allowing a detailed and precise analysis of road materials and conditions, these technologies contribute to the construction of safer, more durable and sustainable highways. In summary, investment in adequate planning, innovation, organization and technological control is essential to guarantee the quality and safety of the country's road infrastructure. It can be seen that these technological advances are transforming paving processes, including quality control

KEY WORDS: Technological Control; Innovation; Paving; Standardization.

¹ Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais - DER-MG, e-mail: faviane.beltrao@der.mg.gov.br; bruna.beleigoli@der.mg.gov.br; anna.braga@der.mg.gov.br

² Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, e-mail: flavianebeltrao@ufmg.br; brunabeltrao@ufmg.br



DOI: [10.29327/1430212.49-4](https://doi.org/10.29327/1430212.49-4)

AVANÇOS TECNOLÓGICOS E
CONTROLE DE QUALIDADE NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

INTRODUÇÃO

A condição do pavimento das estradas tem uma influência direta sobre o desempenho do transporte rodoviário e a economia do Brasil. Quando uma rodovia apresenta um pavimento em más condições, isso resulta em aumento dos custos operacionais do transporte, diminuição do conforto e segurança dos passageiros e cargas, além de provocar impactos ambientais negativos.

A construção de uma rodovia, segundo Magalhães Junior, Oda e Novo (2016), atravessa várias fases, que iniciam com o planejamento abrangente, seguido pelo detalhamento minucioso de cada componente, até finalizar com a construção. Em todos esses estágios, é fundamental que a qualidade seja sempre colocada como o fator mais relevante.

Os investimentos na malha rodoviária ajudam a aquecer a economia, contribuem para reduzir as diferenças regionais e incrementar o desenvolvimento econômico, além de promover a segurança e a qualidade de vida da população. Além disso, as obras de melhoramentos garantem conexões entre cidades com grande potencial de desenvolvimento, reduzindo as desigualdades regionais.

O resultado positivo somente é alcançado quando se envolve planejamento, engenharia e inovação. Diante disto, o DER-MG se reestruturou e criou uma diretoria nova, com foco nesses três pilares. Desta nova estrutura, as gerências de Engenharia e Inovação e Gestão de Ativos Rodoviários se encontram para atingir alguns objetivos em comum.

Desta forma, o controle tecnológico desempenha um papel fundamental na construção e na manutenção dos ativos rodoviários, assegurando qualidade, segurança e durabilidade. De acordo com Magalhães Junior, Oda e Novo (2016), para avaliar a qualidade do pavimento, deve ser feito o controle tecnológico de sua execução. No entanto, apenas aderir aos procedimentos de construção não garante automaticamente a qualidade da obra. É crucial reconhecer a existência de critérios de aceitação e rejeição dos resultados, os quais devem ser rigorosamente observados e verificados por meio do controle tecnológico. Além disso, as atividades de controle de qualidade podem identificar deficiências no projeto, possibilitando sugestões de alterações que visem aprimorar a qualidade dos serviços executados.

Com os avanços tecnológicos, surgiram novos equipamentos e métodos que aprimoram a eficiência e precisão desses controles.

Este estudo investiga os avanços tecnológicos e os procedimentos de controle de qualidade na pavimentação asfáltica. Destaca a importância da inovação e de um controle tecnológico adequado, que envolve profissionais capacitados, rotinas padronizadas e equipamentos calibrados. Resultados confiáveis são essenciais para garantir a qualidade e durabilidade dos ativos rodoviários.

Em resumo, para enfrentar os desafios nas obras rodoviárias no Brasil, é essencial investir em planejamento, inovação, organização, controle tecnológico e fiscalização adequados, garantindo assim a qualidade e a segurança das infraestruturas rodoviárias do país.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Bonfim (2021), pavimento é uma estrutura construída sobre a terraplenagem, projetada para resistir ao clima, aos esforços verticais e horizontais do tráfego de veículos, visando



proporcionar aos usuários melhores condições de trafegabilidade com conforto e segurança. Medina e Motta (2005) vão além, enfatizando que a concepção de um pavimento é mais do que um simples revestimento asfáltico; é um sistema multifacetado, projetado para distribuir e suportar cargas, resistir às intempéries e proporcionar uma superfície segura e duradoura para o deslocamento.

Essa definição destaca a complexidade por trás do que muitos veem apenas como uma pista de rolamento. De acordo com Marchezini et al. (2014), o pavimento é uma estrutura construída após a terraplenagem, destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego.

Para o usuário da via, conforme Bonfim (2021), o importante é a qualidade de conforto ao rolamento, independentemente do aparecimento ou existência de algum tipo de defeito. Avaliar a qualidade dos materiais ou serviços requer uma inspeção técnica, envolvendo coleta de dados, realização de testes, medições precisas e registro fotográfico detalhado.

Avanços Tecnológicos no Controle de Qualidade e Eficiência na Pavimentação

Aqui estão algumas áreas onde esses avanços têm sido especialmente relevantes. Em algumas delas o DER-MG tem se empenhado em introduzir na sua rotina.

- **Materiais Avançados:** Novos materiais, como ligantes modificados e agregados de alta qualidade, estão sendo aplicados para melhorar a resistência ao desgaste, a aderência e a durabilidade do pavimento.
- **Monitoramento por Satélite:** Imagens de satélite serão usadas para monitorar o estado dos ativos rodoviários, identificando áreas com rachaduras, deformações ou outros problemas que possam afetar a qualidade da pavimentação.
- **Modelagem e Simulação:** Ações em modelos computacionais estão sendo desenvolvidos para prever o desempenho futuro das estradas com base em diferentes condições de tráfego e climáticas, permitindo uma gestão mais eficaz.
- **Sensores e Equipados:** Sensores e equipamentos com câmaras de fotos e filmagem vem sendo utilizados para inspecionar a qualidade do pavimento, identificando defeitos e irregularidades.
- **Sistemas de Informação Geográfica (GIS):** Os sistemas GIS estão sendo usados para mapear e gerenciar dados relacionados ao pavimento, permitindo uma análise mais precisa das condições das rodovias e uma programação mais eficiente de atividades.

Ainda nessa mesma abordagem, surgiram equipamentos de ponta especialmente desenvolvidos para aprimorar a eficiência e precisão do processo de controle tecnológico na pavimentação. Entre essas tecnologias, destaca-se o Densímetro não nuclear, utilizado para determinar a densidade do pavimento. Esses dispositivos fornecem leituras rápidas e precisas, permitindo aos engenheiros verificar se a densidade e o grau de compactação do pavimento atendem aos padrões especificados. O uso deste equipamento está previsto na norma DNIT 417/2019.



DOI: [10.29327/1430212.49-4](https://doi.org/10.29327/1430212.49-4)

AVANÇOS TECNOLÓGICOS E CONTROLE DE QUALIDADE NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

Para o controle do teor de betume, além do aparelho Rotarex, pode ser utilizado o forno Mufla de ignição. Segundo Leal et al. (2020), este método envolve a extração a quente do ligante da amostra, através de um processo de queima por convecção. O forno Mufla pode ser equipado ou não com um dispositivo interno para medição de massa e deve incluir um sistema de exaustão para minimizar a emissão de fumaça e evitar que odores indesejáveis escapem no laboratório, garantindo assim a saúde e segurança do operador. O processo de extração a quente realizado pelo forno Mufla envolve o aquecimento da amostra a uma temperatura elevada, o que permite que o ligante asfáltico seja liberado e evaporado. Em seguida, o ligante é coletado e pesado, permitindo calcular o teor de betume na amostra. Outra forma de se realizar a extração de betume é através da utilização do forno NCAT (National Center for Asphalt Technology). O ensaio está descrito na Norma ASTM D6307 – Standard Test Method for Asphalt Content of Hot Mix Asphalt by Ignition.

Para Gonçalves (2017), o equipamento é consideravelmente rápido na determinação do teor de ligante em amostras de 1200g a 1800g, em 30 a 45 minutos, sendo o método da ignição em si é praticamente todo automatizado e o equipamento é capaz de extrair betume de amostras sem o uso de solventes. Também possui filtro cerâmico para eliminar poluentes. Porém, a precisão do forno NCAT é variável em função do tipo de materiais, tendo a necessidade de ser calibrado em cada mistura asfáltica.

Para ensaio de granulometria, o uso da peneira vibratória proporciona a classificação do material por gravidade com movimento predominantemente vertical, onde o dispositivo controla as vibrações e o tempo. Para o controle de espessura das amostras extraídas através dos corpos de prova (CP), a fim de se obter facilidade de leitura e rapidez na obtenção das medições, tais medições podem ser realizadas com o paquímetro digital, em substituição da trena, para garantir maior precisão ao se retirar as quatro medidas do corpo de prova.

Por fim, uso de equipamentos como sondas de ultrassom ou radares de penetração podem ser usados para determinar a espessura do pavimento de forma não destrutiva. Isso permite uma avaliação rápida e precisa da espessura do pavimento em toda a extensão da estrada.

Pode-se perceber que esses avanços tecnológicos estão transformando os processos relativos a pavimentação, incluindo o controle de qualidade, tornando os processos mais eficientes, econômicos e sustentáveis.

Importância e Procedimentos do Controle Tecnológico em Obras de Pavimentação

O controle técnico é essencial para garantir a conformidade com as normas e especificações, através de ensaios e medições para avaliar a qualidade dos serviços e materiais, assim como suas especificações (DNIT, 2006). Nesse contexto, Magalhães Junior, Oda e Novo (2016), afirmam que é essencial considerar o controle de qualidade de duas perspectivas distintas: o controle administrativo e o controle tecnológico, também conhecido como controle qualitativo. Para os autores, o controle administrativo visa verificar a conformidade da execução do trabalho com os requisitos legais e administrativos do contrato. Por sua vez, o controle tecnológico garante a conformidade com as especificações técnicas, avaliando, por meio de ensaios e medições, a qualidade dos serviços, materiais e suas respectivas aplicações. Gonçalves (2017) destaca que o objetivo do controle tecnológico é verificar se as especificações de materiais e misturas asfálticas



estão sendo atendidas. Portanto, investir em controle tecnológico é fundamental para evitar custos adicionais e garantir a durabilidade das obras.

Um ponto crucial ressaltado por Balbo (2007) é a questão da falta de controle tecnológico adequado e a negligência nos processos construtivos em obras rodoviárias no Brasil, o que pode acarretar em atrasos, custos adicionais e até mesmo em falhas estruturais. Magalhães Junior, Oda e Novo (2016) ressaltam que na construção de uma rodovia é fundamental que a qualidade seja sempre colocada como fator relevante em todas as etapas. As exigências de controle de qualidade e os métodos de ensaio são especificados para se assegurar que a obra responda às normas de qualidade mínima apropriadas ao comportamento desejado. Assim, a qualidade obtida em conformidade com as normas, por ocasião das obras, é um complemento à qualidade do projeto.

O controle de qualidade abrange, de acordo com Gonçalves (2017), não apenas ensaios para verificar a conformidade da produção com o projeto, mas também a adequação das instalações, instrumentos, calibração de equipamentos, métodos e documentações necessárias, bem como a competência técnica dos profissionais envolvidos no empreendimento.

A norma DNIT 031/2006-ES estipula diversos ensaios, como a extração de betume, controle geométrico, resistência à tração por compressão diametral (RTCD) e caracterização Marshall, para garantir o controle da qualidade das misturas asfálticas.

Fonseca (2016) explica que os controles de qualidade para o revestimento asfáltico incluem o monitoramento das temperaturas dos agregados e do ligante asfáltico, parâmetros Marshall da mistura, teor de betume, granulometria da mistura, e controle de compactação.

O método vigente nos órgãos rodoviários para dosagem de concretos asfálticos é a metodologia Marshall, mesmo com os avanços científicos na área de dosagem com o método Superpave. Gonçalves (2017). No Brasil, a determinação do teor de ligante difere para cada órgão, instituição ou empresa. O mais recorrente é a escolha do teor de ligante em relação ao Volume de Vazios correspondente a 4%, também sendo comum escolher uma média entre os teores obtidos através da máxima estabilidade e pela máxima massa específica aparente da amostra compactada (Bernucci et al., 2006).

Para garantir que o revestimento apresente uma dosagem que atenda aos requisitos normativos e de projeto, um controle tecnológico eficiente é essencial. Leal et al. (2020).

MÉTODOS

Identificação e contextualização de trecho através de ferramentas GIS

O *GIS* (acrônimo inglês de **Geographic Information System**) ou Sistemas de Informações Geográficas é uma importante ferramenta de coleta e tratamento de informações georreferenciadas, com inúmeras possibilidades de aplicação, entre elas a análise do espaço geográfico com base em um conjunto de aspectos de uma área, o que os torna uma ferramenta muito prática e de grande importância para o planejamento.



DOI: 10.29327/1430212.49-4

AVANÇOS TECNOLÓGICOS E CONTROLE DE QUALIDADE NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

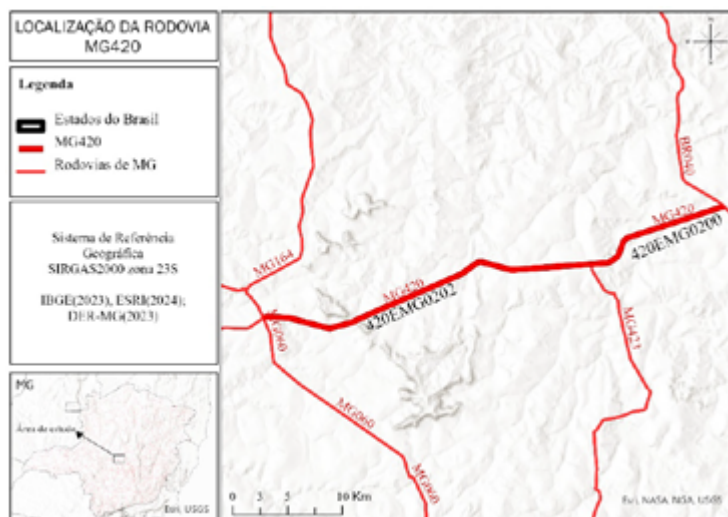


Figura 1. Localização de um trecho com uso da ferramenta *ArcGIS*. (OS AUTORES, 2024)



Figura 2. Localização de um trecho de estudo com uso da ferramenta *Infracad*. (OS AUTORES, 2024)

Coleta da amostra de Asfalto

Segundo Fonseca (2016), o controle da compactação pode ser efetuado por meio de uma sonda rotativa, que extrai CP's (Corpos de Prova) de uma camada de pavimento já executada, com o propósito de verificar o grau de compactação alcançado na referida camada. Conforme as diretrizes do DNIT (2006), o Grau de Compactação (GC) deve situar-se entre 97% e 102% para ser considerado dentro das especificações

Os procedimentos para a retirada das amostras envolvem a extração dos corpos de prova utilizando sonda extratora rotativa, conforme figura. A coleta é realizada por servidores do laboratório, em colaboração com os representantes da empresa responsável pela manutenção do trecho em questão. Este procedimento visa garantir a transparência e a cooperação entre as partes envolvidas para melhor controle de qualidade dos serviços.



BRUNA CRISTINA BELTRÃO SILVA BELEIGOLI,
FLAVIANE BELTRÃO SILVA,
ANNA LUIZA BRAGAAMARAL



Figura 3. Coleta de corpos de prova na Rodovia (OS AUTORES, 2023)

Medidas de Diâmetro e Espessura

Em relação ao controle tecnológico da espessura da camada dos corpos de prova coletados, a Norma DNIT 031/2006-ES preconiza que ela deve ser medida por ocasião da extração dos corpos-de-prova na pista, ou pelo nivelamento do eixo e dos bordos, antes e depois do espalhamento e compactação da mistura, admitindo-se uma variação de $\pm 5\%$ em relação às espessuras de projeto

Existem vários métodos para controlar a espessura do pavimento. Ilustramos a aferição utilizando a trena, e em seguida utilizando o paquímetro digital com presença de visor, onde mostra os valores em cm/mm e também em polegadas automaticamente.



Figura 4. Controle da espessura dos corpos de prova com utilização de trena (OS AUTORES, 2023)



Figura 5. Controle da espessura dos corpos de prova com utilização de paquímetro digital (OS AUTORES, 2023)

DOI: [10.29327/1430212.49-4](https://doi.org/10.29327/1430212.49-4)

AVANÇOS TECNOLÓGICOS E CONTROLE DE QUALIDADE NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

Após a extração das amostras retiradas do pavimento, as amostras são cuidadosamente limpas em laboratório para remover todos os fragmentos indesejados e fragmentos. A medição é feita da seguinte forma: quatro pontos opostos de referência são medidos e a média entre esses pontos corresponde às dimensões do corpo de prova. A tabela abaixo ilustra o ponto exato da coleta, espessura medida e a posição do furo em relação ao eixo da via.

Rodovia MG 420 /MG060 entr.BR 040 Pompéu		
Quilômetro (KM)	Espessura média (cm)	Posição do Furo em Relação a Via
0,1	4,5	LADO DIREITO
1,5	4	EIXO
2,6	4,8	LADO ESQUERDO

Tabela 1. Controle da espessura dos corpos de prova após medição (OS AUTORES, 2023)

Teor de Betume

Em relação ao controle do teor de betume, Leal et al. (2020) indicam que é realizado de acordo com normas brasileiras padronizadas, como a DNIT 158/2011-ME, DNER-ME 053/94 e NBR 16208:2013.

Citamos como exemplo de aplicação:

O Método do Rotarex, onde a finalidade é a extração de betume corpo de prova, através do método centrífuga utilizando percloroetileno como solvente.



Figura 7. Aparelho Rotarex (<https://renacerindustriacatalogo/rotarex-manual-2023>)

E o Forno Mufla para extração de Betume – NCAT, que é constituído por um aparelho de alta precisão, combinando um forno de ignição com um sistema de pesagem contínua para monitorar automaticamente a perda de peso da amostra de asfalto e determinação do teor do ligante no final do ensaio.



Figura 8. Forno Mufla para extração de Betume (<https://www.primotradesolutions.com> - 2023)



Utilizando percloroetileno como solvente, foram realizadas determinações do percentual de betume em três corpos de prova extraídos da camada do pavimento com o aparelho rotarex.

Rodovia MG 420 /MG060 entr.BR 040 Pompéu		
Quilômetro (KM)	teor de Betume % CAP	Posição do Furo em Relação a Via
0,1	5,6	LADO DIREITO
1,5	5,5	EIXO
2,6	5,6	LADO ESQUERDO

Tabela 2. Controle do teor de betume de corpos de prova após extração (OS AUTORES, 2023)

Granulometria

A análise da granulometria do solo verifica a distribuição das partículas que nele constituem, sejam elas de natureza inorgânica ou mineral, em classes de tamanho. Essa informação também é chamada de fração granulométrica.

De acordo com Fonseca (2016), para verificar e conferir a faixa granulométrica empregada, é realizado o ensaio de granulometria de acordo com a norma, utilizando o agregado restante da amostra utilizada no ensaio de extração de betume. Esse ensaio avalia a distribuição de tamanho das partículas presentes no material após a remoção do betume, o que influencia diretamente características como compactabilidade, permeabilidade, resistência e aderência do material

Nos ensaios de análise granulométrica, devem ser considerados o peso da amostra utilizada, o tempo e a precisão do ensaio, além da forma como será conduzido o ensaio:

- Peneiramento manual onde o operador conduz o ensaio agitando as amostras no conjunto de peneiras.



Figura 9. Conjunto de peneiras em peneiramento manual (OS AUTORES, 2023)

- Peneirador vibratório ou agitador de peneiras: é um dispositivo para controle das vibrações e tempo.



DOI: 10.29327/1430212.49-4

AVANÇOS TECNOLÓGICOS E
CONTROLE DE QUALIDADE NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

Os resultados da análise granulométrica são mostrados nas figuras 11 e 12 onde o objetivo é o enquadramento das curvas nos limites estabelecidos para faixas de trabalho.

Km	ESPESSURA (cm)	GRANULOMETRIA (% passando)										
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#10	#40	#80	#200
		50,8	38,1	25,4	19,0	12,7	9,5	4,8	2,0	0,42	0,18	0,075
0,100	4,5		100	100	100	98,8	87,2	63,1	41,4	15,8	11,4	9,4
1,500	4,0		100	100	100	100	92,8	66,0	42,5	18,1	12,2	9,8
2,600	4,8		100	100	100	100	87,6	67,6	33,9	18,6	13,2	10,9

Figura 11 – Análise Granulométrica. (Os autores, 2024)

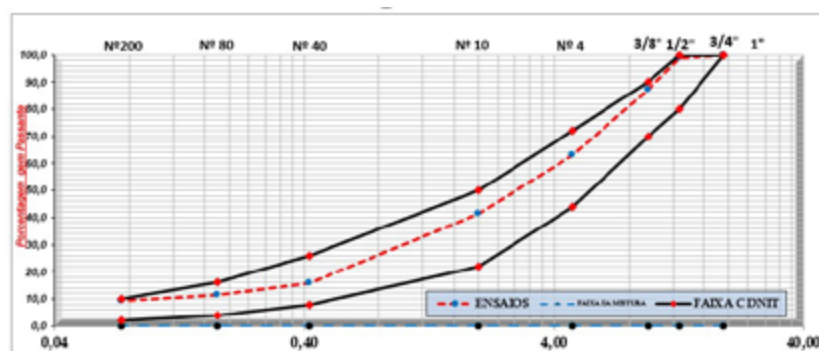


Figura 12 - Curva Granulométrica (OS AUTORES, 2024)

DISCUSSÕES

Neste estudo, foi proposto apresentar avanços tecnológicos, discutir e avaliar os processos utilizados na pavimentação asfáltica.

A importância desses ensaios no controle tecnológico de obras de pavimentação reside na sua capacidade de fornecer informações precisas e confiáveis sobre as propriedades dos materiais utilizados. Por meio da análise dos resultados desses ensaios, os engenheiros podem avaliar se as misturas asfálticas atendem aos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas e especificações do projeto, garantindo assim a qualidade e a durabilidade das vias pavimentadas.

No entanto, apesar dos benefícios evidentes, algumas dificuldades surgem durante a implementação dessas inovações. Uma das principais dificuldades é a resistência à mudança, seja devido a preocupações com custos adicionais ou à falta de familiaridade com as novas tecnologias. Além disso, a necessidade de investimentos significativos em treinamento e infraestrutura pode representar um desafio adicional para órgãos governamentais e empresas do setor.

Apesar dessas dificuldades, os benefícios do controle tecnológico na pavimentação são inegáveis. A capacidade de monitorar de forma precisa e contínua o estado das estradas, identificar problemas antes que se tornem críticos e otimizar os processos de construção e manutenção resulta em economia de custos a longo prazo, maior segurança para os usuários das vias e uma infraestrutura rodoviária mais resiliente às condições climáticas e ao tráfego intenso.



Além disso, a implementação bem-sucedida do controle tecnológico promove uma cultura de qualidade e inovação dentro das organizações, incentivando a busca contínua por melhores práticas e soluções mais eficientes. A padronização dos procedimentos de controle e a adoção de equipamentos modernos também contribuem para a transparência e accountability em projetos de pavimentação, garantindo que as normas e regulamentos sejam rigorosamente seguidos.

Diante disso, concluímos que o investimento em controle tecnológico é fundamental para o desenvolvimento sustentável das infraestruturas rodoviárias no Brasil. Ao superar as dificuldades inerentes e aproveitar as vantagens oferecidas pelas inovações, podemos garantir vias mais seguras, duráveis e eficientes para o transporte rodoviário, promovendo o crescimento econômico e a qualidade de vida da população.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALBO, J.T. Pavimentação Asfáltica: Materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007
- BERNUCCI, L.B. et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. PETROBRÁS. ABEDA. Rio de Janeiro, 2008
- BONFIM, VALMIR. Pavimento Sustentável.1. ed. São Paulo,2021
- CARAVANTES, G.R.; PANNO, C.C.; KLOECKNER, M.C. Administração: Teorias e processos. São Paulo: Pearson, 2008.
- COLTRE, Sandra Maria. Fundamentos da administração: um olhar transversal. 1. ed. Curitiba: Intersaberes, 2014. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 19 mar. 2024.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.(DNER).ME 043/95: Misturas Betuminosas a Quente-ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.(DNER).ME 053/94: Misturas Betuminosas – Porcentagem de Betume. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.(DNER).ME 083/98: Agregados-Análise Granulométrica. Rio de Janeiro,1998 –Porcentagem de Betume. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). ME 117/94: Mistura Betuminosa-determinação da densidade Aparente. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2006 ES: Pavimentos Flexíveis: concreto asfáltico: especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2006. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ :IPR 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 131/94: Solos – módulo de resiliência de amostras compactadas. Rio de Janeiro, 1994
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 417/19: Solos – Solos – Controle de Compactação com Equipamento Densímetro Eletromagnético – Método de Ensaio.Rio de Janeiro, 2019



[DOI: 10.29327/1430212.49-4](https://doi.org/10.29327/1430212.49-4)

AVANÇOS TECNOLÓGICOS E
CONTROLE DE QUALIDADE NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

FONSECA, A.M. Avaliação da influência do Controle Tecnológico na Qualidade de Obras de Pavimentação- Estudo de caso: Viário do Parque Olímpico. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016

FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V. Controle tecnológico e controle de qualidade - um alerta sobre sua importância. Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 2004. Brasília. Anais do Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 2004.

GONÇALVES, Bruno César Silva. Avaliação dos Procedimentos para Determinação de Teor de Ligante e Granulometria em Concretos Asfálticos de diferentes faixas Granulométricas e origens Mineralógicas. Santa Maria, RS. 2017.

LEAL, K. S.; ALMEIDA, M.S.S.; SOUZA, T.A.; NETO, F.A.S.; COSTA, W.G.S. Avaliação da eficiência da mufla na extração de ligantes de misturas asfálticas densas. 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 2020.

MAGALHAES Junior, F. L., Oda, S., & Novo, J. M. F. (2016). Título: Desenvolvimento de um sistema de qualidade das obras de infraestrutura de transportes. [Projeto de Pesquisa]. (Área de Concentração: Desenvolvimento Urbano e Infraestrutura, Tema: Transportes e Mobilidade Urbana). Escola de Contas TCE RJ.

MANCILHA, Ogor O; LEMOS, Carolina. L; PEREIRA, Alex G. Controle tecnológico de uma obra asfáltica da Avenida Farquar/RO. Revista de Engenharia e Tecnologia. V.13, nº4, dezembro 2021.

MARCHEZINE, Silvana, F; CRUZ, Danilo A; FIGUEIREDO, Luiz C; Controle tecnológico da camada de revestimento de cauq de Cuiabá: análise das propriedades. 43ª RAPV – Reunião anual de pavimentação e 17º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 2014.

MEDINA, J. MOTTA, L.M.G. Mecânica dos pavimentos. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005, 570 p.



CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DA COMPACTAÇÃO *IN SITU* DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Jorge Luis Santos Ferreira²; Euller Loiola Sena¹; Eliardo Soares Coelho²; Juceline Batista dos Santos Bastos³ & Jorge Barbosa Soares¹

RESUMO

Apesar das diferentes abordagens para a definição de qualidade, entende-se que a minimização da variabilidade das principais características de um produto ou processo proporciona um ganho nesse quesito. Para esse fim, necessita-se primeiramente mensurar tal variabilidade. Visando agregar maior qualidade às obras de pavimentação asfáltica, este trabalho descreve e compara estatisticamente as variações que ocorrem durante a etapa de compactação de misturas asfálticas densas em três obras rodoviárias reais, tendo o grau de compactação (GC) como indicador de qualidade. Para as obras em análise, os resultados indicam a ocorrência de variações intrínsecas ao tipo de serviço, mas também revelam um quadro de inconformidades normativas e diferenças estatísticas significativas entre as variações observadas ao longo da execução, o que indica potencial para aprimoramento do processo construtivo. A abordagem estatística proposta agrega uma compreensão quantitativa do processo executivo e pode ser utilizado pelas empresas construtoras para aperfeiçoar seus procedimentos objetivando a melhoria da qualidade. De modo complementar, ao ser aplicada a obras já executadas e/ou em execução, os órgãos de controle adquirem referências úteis para auxiliar o planejamento e a consecução das auditorias de conformidade de modo otimizado e preciso.

PALAVRAS-CHAVE: Variabilidade; Misturas Asfálticas; Qualidade.

ABSTRACT

Despite the different approaches to defining quality, it is understood that minimizing the variability of the main characteristics of a product or process provides a gain in quality. For this purpose, it is necessary to first measure such variability. Aiming to add greater quality to asphalt pavement works, this study describes and statistically compares the variations that occur during the compaction stage of dense asphalt mixtures in three real road jobs, with the degree of compaction (GC) as quality indicator. For the works under analysis, the results indicate variations intrinsic to the type of service, but also reveal a scenario of normative non-conformities and significant statistical differences among the variations observed throughout construction, indicating a potential for improvement in the process. The proposed statistical approach adds a quantitative understanding of the execution process and can be used by contractors to improve their procedures aiming at quality improvement. Additionally, when applied to works already completed and/or in progress, regulatory agencies acquire useful references to assist in the planning and implementation of compliance audits in an optimized and precise manner.

KEY WORDS: Variability; Hot Mix Asphalt; Quality.

¹ Universidade Federal do Ceará, e-mail: euller.loiola@det.ufc.br; jsoares@det.ufc.br

² Universidade Federal do Ceará – Campus de Crateús, e-mail: jorge@crateus.ufc.br; eliardosoares@alu.ufc.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, e-mail: juceline.santos@ifce.edu.br



DOI: [10.29327/1430212.49-3](https://doi.org/10.29327/1430212.49-3)

CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DA COMPACTAÇÃO IN SITU DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

INTRODUÇÃO

A concepção de qualidade na construção rodoviária adota uma abordagem centrada na produção, associada ao nível de conformidade com as especificações, um dos cinco conceitos propostos por Garvin (1992). Também pode-se entendê-la como uma característica inversamente proporcional à variabilidade (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). Obras rodoviárias possuem, por natureza, grande extensão, o que faz com que haja enorme variabilidade nas características dos materiais que a compõem, tanto ao longo do trecho como em cada uma das suas camadas (AASHTO, 2003). Assim, aponta-se que o controle da variabilidade é um dos principais obstáculos para o controle de qualidade de obras rodoviárias.

Embora a literatura traga diferentes investigações sobre a variabilidade da composição de misturas asfálticas densas, bem como o impacto dessa variabilidade em seu comportamento mecânico (MOHAMMAD *et al.*, 2013; KASSEM; NAJJAR; CHEHAB, 2016, 2020; LIU *et al.*, 2017, 2021), ainda há pouquíssimos registros de um esforço semelhante em nível nacional (SANTOS *et al.*, 2020). Em face da relação entre variabilidade e qualidade, há a necessidade de se mensurar as oscilações dos principais parâmetros construtivos visando melhorias tanto na execução quanto na fiscalização de obras rodoviárias. Em um processo produtivo, uma maior variabilidade resulta em menor previsibilidade, menor continuidade e maior suscetibilidade a erros.

Nesse contexto, e apoiado na documentação de controle de qualidade produzido ao longo da execução de algumas obras rodoviárias estaduais, este artigo compara sistematicamente as variações ocorridas durante a etapa de compactação de misturas asfálticas densas, para as quais adota-se o grau de compactação (GC) como indicador de qualidade dessa etapa.

Para Liu *et al.* (2018), há um certo consenso de que a compactação desempenha um papel crucial para o desempenho de pavimentos flexíveis. Porém, a literatura não contempla explicitamente o efeito da variação do grau de compactação da mistura asfáltica em seu desempenho. No entanto, tem-se explorado a influência do volume de vazios e da densidade aparente, as quais tem relação direta com o grau de compactação. Em um dos trabalhos pioneiros nessa temática, Linden *et al.* (1989) identificaram a relação existente entre a vida de serviço e a massa específica máxima medida da mistura asfáltica não compactada. Estes autores afirmam que, de modo particular para misturas asfálticas com volume de vazios igual ou superior a 7,0%, a elevação dessa característica da mistura asfáltica em 1,0% implica na perda de aproximadamente 10,0% da vida de serviço do revestimento.

Sabe-se que uma compactação insuficiente reduz a rigidez da mistura asfáltica, o que pode induzir o desenvolvimento de defeitos prematuros (LI *et al.*, 2017; VACKOVÁ; VALENTIN; KOTOUSOVÁ, 2017). Tran *et al.* (2016), apontam que o desempenho quanto ao trincamento por fadiga e ao acúmulo de deformação permanente em misturas asfálticas podem aumentar entre 8,2 a 43,8% e 7,3 a 66,3%, respectivamente, pela simples redução de 1,0% no volume de vazios. Além do mais, a compactação deficiente e um menor grau de compactação gera uma maior presença de vazios, o que favorece a oxidação do ligante asfáltico e a penetração de água no interior da camada asfáltica. Por outro lado, a compactação excessiva pode causar fragmentação dos agregados e exige



mais consumo de energia durante a execução (MALLICK, 1999). Outra consequência é uma maior possibilidade de segregação de ligante asfáltico em razão do reduzido volume de vazios.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este artigo foi desenvolvido a partir da documentação de três obras rodoviárias estaduais localizadas na Região Metropolitana de Fortaleza sob jurisdição da Superintendência de Obras Públicas (SOP) do Estado do Ceará. Os documentos analisados incluem os relatórios de acompanhamento e controle tecnológico da camada de rolamento em concreto asfáltico referentes aos seus respectivos períodos de execução. Por questões de confidencialidade, as obras são chamadas de Obra 1, Obra 2 e Obra 3.

As Obras 2 e 3 foram executadas por empresas distintas, enquanto a Obra 1 foi executada pela mesma empresa da Obra 2 em consórcio com uma terceira empresa, a qual ficou responsável pelas subcamadas. Mesmo que a documentação consultada não permita uma conclusão precisa, espera-se que os revestimentos asfálticos das Obras 1 e 2 compartilhem da mesma técnica executiva. Sobre a Obra 3, não há elementos que permitam uma comparação direta com as demais obras. Em termos constitutivos, todas as obras em análise utilizam, na camada de rolamento, concreto asfáltico com CAP 50/70 convencional nos teores de 5,5 (Obras 1 e 3) e 5,8 (Obra 2) e granulometria enquadrada na faixa C do DNIT. Estas camadas foram executadas com espessuras de 5,0 cm (Obra 1) e 6,5 cm (Obras 2 e 3).

A avaliação estatística foi conduzida no software Minitab® e considerou-se as características relevantes para o adequado desempenho da mistura asfáltica associadas à etapa de compactação (grau de compactação). Para a Obra 1, foram avaliadas 345 amostras em 12 medições; para a Obra 2, 685 amostras em 28 medições; e para a Obra 3, 194 amostras em 10 medições, totalizando 1224 amostras. A variabilidade das obras foi explorada sob duas abordagens estatísticas distintas, quais sejam: (i) análise descritiva e comparativa das medições mensais ao longo da execução de cada obra; e (ii) avaliação da uniformidade das variações no processo executivo no decorrer dos semestres.

Para a análise descritiva e comparativa das medições, adotou-se o diagrama de caixa ou *boxplot* (Figura 1), o qual fornece uma perspectiva sobre o caráter dos dados incluindo variabilidade, simetria e ocorrência de valores discrepantes (*outliers*). Além do mais, por não depender da média, essa ferramenta adequa-se bem para descrever conjuntos de dados com distribuição não normal. Ressalta-se que em trabalho recente, Sena (2023) identificou fortes indícios de não normalidade nos valores de algumas características de misturas asfálticas aplicadas em obras rodoviárias locais, incluindo o grau de compactação.

O boxplot é normalmente representado com uma caixa vertical contendo diversas características relevantes do conjunto de dados, tais como a mediana (centro), dispersão e assimetria. Como apresentado na Figura 1, a face inferior da caixa representa o 1º quartil (Q_1), que é o valor para o qual 25% dos dados são menores ou iguais a ele. A face superior é o 3º quartil (Q_3), onde 75% dos valores amostrais são menores ou iguais a ele. Desse modo, o intervalo entre Q_1 e Q_3 , chamado de



DOI: 10.29327/1430212.49-3

CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DA COMPACTAÇÃO
IN SITU DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

intervalo ou amplitude interquartil (IIQ ou AIQ), concentra 50% dos valores amostrais. Nota-se que a mediana (2º quartil ou 50º percentil) é representada por uma linha horizontal que cruza a caixa, não necessariamente em seu centro.

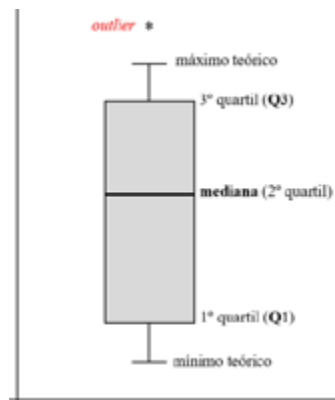


Figura 1. Representação qualitativa do diagrama de caixa ou *boxplot* (Autores, 2024).

De cada extremidade da caixa estende-se duas hastes que representam os limites teóricos. A haste inferior é uma linha de Q_1 até o valor mínimo teórico ($V_{\text{mín}}$), o qual é calculado pela Equação 1. A haste superior é uma linha de Q_3 até o valor máximo teórico ($V_{\text{máx}}$) obtido pela Equação 2. Valores amostrais abaixo do mínimo ou acima do máximo teórico são classificados como *outliers*.

$$V_{\text{mín}} = Q_1 - 1,5 \times AIQ \quad (1)$$

$$V_{\text{máx}} = Q_3 + 1,5 \times AIQ \quad (2)$$

Em termos de uniformidade de execução, as variações amostrais observadas na etapa de compactação de misturas asfálticas são basicamente de duas naturezas: (i) variabilidade natural intrínseca ao processo, a qual não pode ser evitada, mas deve ser quantificada e minimizada; e (ii) variabilidade associada à incapacidade do responsável conceber o produto sob condições controladas, ou seja, em conformidade com as normas e com características físicas e mecânicas semelhantes ao longo do processo.

Nesse cenário, buscou-se comparar estatisticamente as variações ocorridas no decorrer da obra. Para tanto, inicialmente agrupou-se os valores amostrais em semestres conforme indicado na Tabela 1. Os semestres foram marcados a partir do primeiro mês em que houve medição da propriedade em análise (GC). Na sequência, aplicou-se simultaneamente dois testes de igualdade de desvios padrão para um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), sendo estes: (i) método de comparações múltiplas, e (ii) método de Levene modificado. Ambos os testes avaliam a aceitação ou rejeição da hipótese nula (H_0), que nesse trabalho trata-se da igualdade dos desvios padrão entre os grupos (semestres). Para mais detalhes sobre tais testes, o leitor é direcionado a Almeida *et al.* (2008) e Banga e Fox (2013).



JORGE LUIS SANTOS FERREIRA,
EULLER LOIOLASENA, ELIARDO SOARES COELHO,
JUCELINE BATISTA DOS SANTOS BASTOS, JORGE BARBOSASOARES

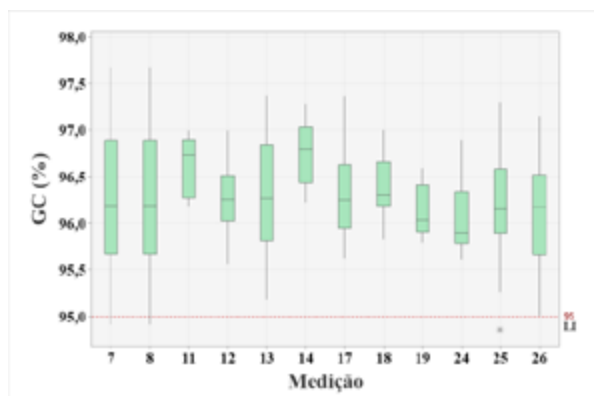
Tabela 1. Detalhamento dos semestres adotados nos testes de igualdade de desvios padrão (Autores, 2024).

	Semestres						
	1	2	3	4	5	6	7
Obra 1	mar/2020 a ago/2020	set/2020 a fev/2021	mar/2021 a ago/2021	set/2021 a fev/2022	-	-	-
Obra 2	jul/2014 a dez/2014	jan/2015 a jun/2015	jul/2015 a dez/2015	jan/2016 a jun/2016	jul/2016 a dez/2016	jan/2017 a jun/2017	jul/2017 a dez/2017
Obra 3	nov/2018 a abr/2019	mai/2019 a out/19	nov/2019 a abr/2020	-	-	-	-

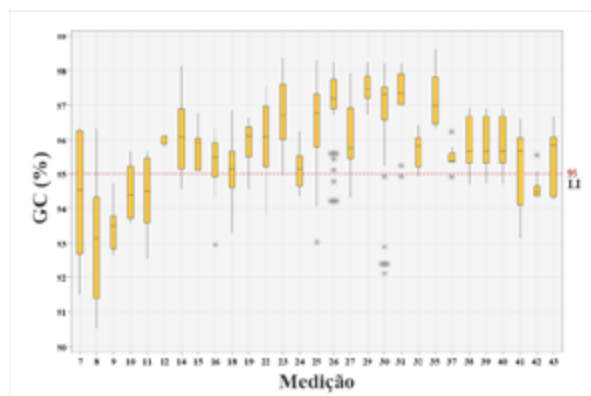
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise Descritiva das Medições

Analisando as amplitudes amostrais do GC da Obra 1 (Figura 2a) nota-se uma pequena variabilidade nas dispersões entre medições. Em alguns casos a diferença entre os valores máximo e mínimo é superior a 2,5% (e.g., medições 7 e 8), já em outros casos é inferior a 1,0% (e.g., medições 11 e 19). Para boa parte das medições, a dispersão de valores amostrais ocorre acima do limite inferior (LI = 95%) indicado pelo órgão local (SOP-ESP-13/2019). Observa-se também a ocorrência de algumas inconformidades nas medições iniciais e finais da obra, as quais também possuem as maiores diferenças entre os valores máximo e mínimo (medições 7, 8, 25 e 26). Aparentemente há um maior controle sobre o processo executivo nas medições intermediárias.



(a) Obra 1

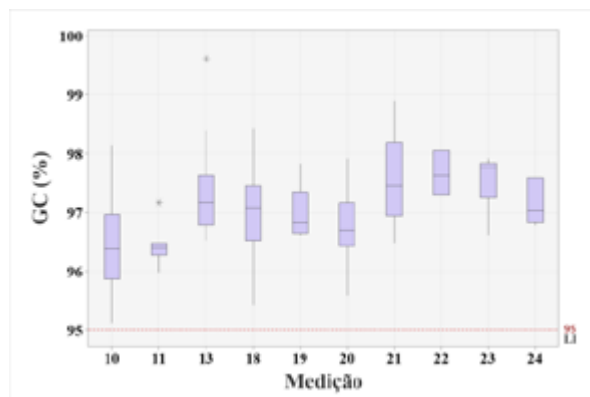


(b) Obra 2



DOI: 10.29327/1430212.49-3

CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DA COMPACTAÇÃO IN SITU DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS



(c) Obra 3

Figura 2. *Boxplots* do GC relativos a todas as medições em que o serviço foi executado (Autores, 2024).

Pela Figura 2b é possível identificar que a Obra 2 é claramente aquela de menor qualidade executiva sob o critério de compactação, sobretudo nas medições iniciais. Na medição 7, por exemplo, em torno de 60% dos valores amostrais estão abaixo do LI. A situação é ainda pior para as medições 8 e 9, onde nesta última, 100% das amostras não atendem à especificação. O processo de compactação aparenta ser uma situação problemática ao longo de toda a execução desta obra, ainda que em menor intensidade após a medição 11. No decorrer da obra nota-se muitas medições com inconformidades, algumas delas com medianas próximas ao LI, o que se reflete em um percentual de inconformidades em torno de 50%, além de amplitudes bastante variáveis entre medições. Destaca-se ainda a recorrência de valores discrepantes (*outliers*) abaixo do valor mínimo especificado entre as medições 16 e 37.

Por outro lado, a Obra 3 (Figura 2c) possui pouca variação do GC no decorrer da execução, o que pode caracterizar um maior controle sobre o processo executivo, mais especificamente sobre a compactação do concreto asfáltico. Destaca-se também a ausência de inconformidades, isto é, todos os valores observados nas amostragens de cada medição estão acima do LI especificado. Ainda que haja uma variação nas medianas, a diferença entre as medianas mínima e máxima é da ordem de apenas 1%. De modo particular, a análise da Obra 3 ratifica a natureza variável das obras de pavimentação. Mesmo com aparente controle sobre o processo executivo, ainda se observam oscilações nos valores amostrais.

Avaliação da Uniformidade Executiva

Conforme já indicado, aplicou-se dois testes de hipótese (método de comparações múltiplas e método de Levene modificado) como critérios para a identificação da ocorrência de variações destoantes de GC ao longo da execução do revestimento. A Figura 3 explicita estes resultados para GC. Nessa análise, os valores foram agrupados por semestre visando ampliar o número de amostras e obter maior precisão nos intervalos de incerteza.



JORGE LUIS SANTOS FERREIRA,
EULLER LOIOLASENA, ELIARDO SOARES COELHO,
JUCELINE BATISTA DOS SANTOS BASTOS, JORGE BARBOSASOARES

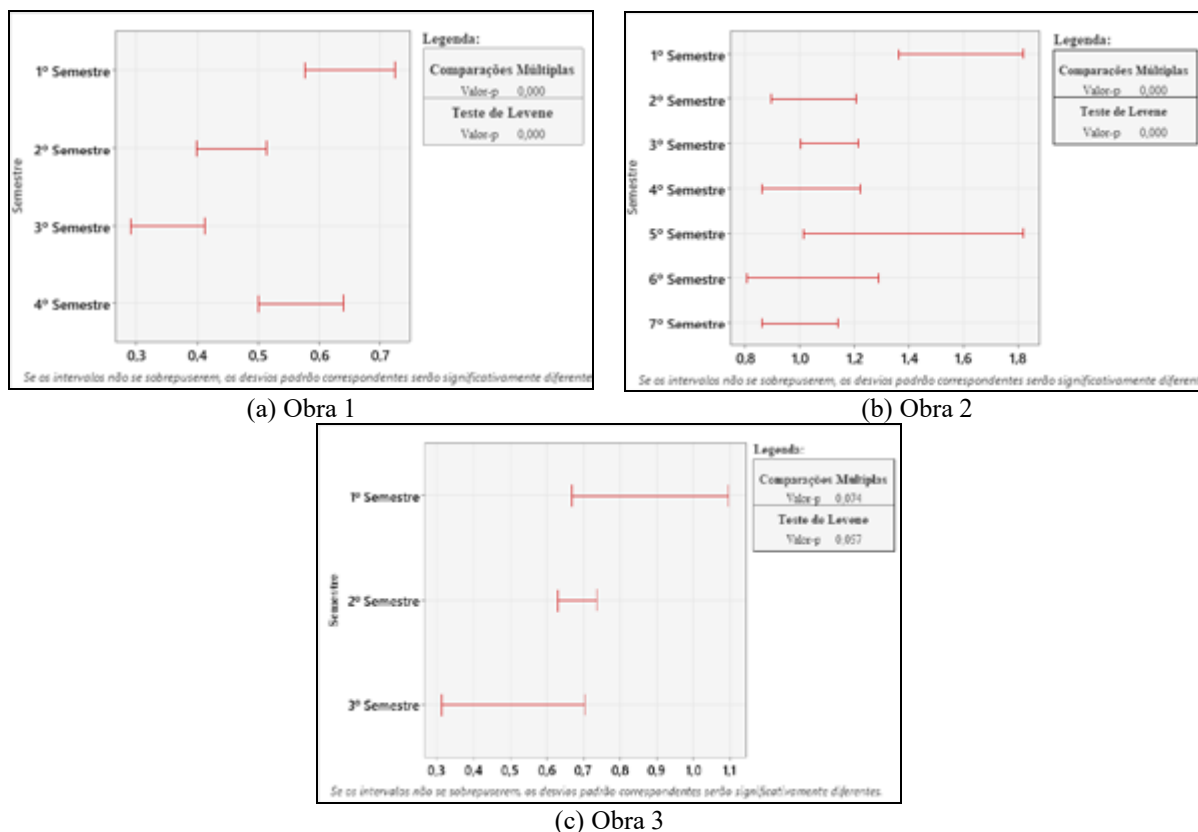


Figura 3. Testes de igualdade de desvios padrão para GC (Autores, 2024).

Os intervalos de incerteza para o GC mostrados na Figura 3 indicam que há casos de não sobreposição em alguns destes intervalos. Os valores-p obtidos nos testes de hipótese corroboram que há diferenças estatísticas significativas nos valores de GC entre os semestres das Obras 1 e 2 (Figuras 3a e 3b, respectivamente). No caso da Obra 1 (Figura 3a), a dispersão observada no primeiro semestre é estatisticamente semelhante apenas ao último semestre e a dispersão do terceiro assemelha-se exclusivamente ao segundo.

Para a Obra 2 (Figura 3b), o intervalo de incerteza estimado para o 1º semestre diverge significativamente de todos dos demais, exceto do 5º semestre. Espera-se que um processo construtivo estável apresente variações semelhantes ao longo do tempo, o que não foi observado na obra em tela, não só pela diferença estatística, mas também pelo maior valor máximo do desvio padrão estimado pelo intervalo de incerteza nas medições do 1º e 5º semestres. Por último, a Obra 3 (Figura 3c) não apresentou diferença estatística significativa em sua variabilidade executiva semestral, caracterizando melhor controle de qualidade.

Pode-se observar algumas tendências de comportamento executivo relacionado à qualidade das obras em análise. Primeiro, atenta-se para o fato dos intervalos de incerteza que contemplam os maiores valores de dispersão (desvio padrão) ocorrerem no 1º semestre. Em segundo lugar, embora não seja um comportamento geral, os intervalos de incerteza englobam valores de desvio padrão cada vez menores nos semestres subsequentes. Dessa forma, pode-se supor que há uma propensão



DOI: [10.29327/1430212.49-3](https://doi.org/10.29327/1430212.49-3)

CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DA COMPACTAÇÃO IN SITU DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

de redução da variabilidade da compactação da mistura asfáltica com o avanço da obra mesmo para diferentes empresas construtoras. Tal fato pode sugerir uma curva de aprendizado e/ou um controle mais rigoroso das obras no decorrer do tempo. Se tal observação de fato se reproduzir como evidência em um maior conjunto de obras, um desafio relevante é trazer tais aspectos (aprendizado e/ou controle) para o mais cedo possível nas obras.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A descrição e a comparação sistemática da variabilidade da etapa compactação de misturas asfálticas densas por meio de ferramentas estatísticas permitiram enxergar o processo executivo do revestimento asfáltico sob uma ótica pouco explorada no ambiente técnico e acadêmico. De modo geral, ratificou-se a variabilidade inerente à etapa em análise (compactação). Por outro lado, observou-se a ocorrência de muitas inconformidades e distintos padrões executivos ao longo das diferentes etapas das obras. Em alguns casos, há evidências de uma diferença estatística significativa entre os desvios padrão semestrais, o que pode estar relacionado a uma menor estabilidade do processo construtivo.

As análises estatísticas realizadas mostram-se particularmente úteis para o controle, garantia e melhoria da qualidade em obras rodoviárias, pois trazem uma compreensão complementar à abordagem tipicamente adotada no controle estatístico de obras e serviços rodoviários normatizada em nosso país, qual seja, a norma DNER-PRO 277/97. Ainda que esta norma estabeleça um método útil e consistente para orientar a aceitação ou rejeição do produto (i.e., daquilo que foi executado), este traz uma avaliação pontual e está relacionado a uma postura reativa em relação à má qualidade, ou seja, a ação dos envolvidos é motivada sobretudo pela rejeição de algo já executado, o que gera retrabalho e impacta prazos e custos.

Por outro lado, ao monitorar o processo em termos de conformidade, dispersão amostral e uniformidade executiva tem-se uma visão ampla e contínua, induzindo uma postura preventiva, onde pode-se tomar decisões antecipadas a fim de evitar a execução com má qualidade. Dessa forma, minimiza-se o retrabalho. Além disso, o uso de ferramentas estatísticas fornece uma compreensão rica sobre o processo executivo, a qual pode ser utilizada pelas construtoras para aperfeiçoar seus processos e orientar ações de melhoria da qualidade visando obras futuras.

Os ganhos associados à compreensão objetiva do processo executivo alcançam também os órgãos rodoviários e especialmente os órgãos de controle interno e externo, sendo para estes últimos, uma ferramenta viável no auxílio às auditorias de conformidade. A caracterização estatística dos dados produzidos ao longo da execução de diversas obras de pavimentação pode evidenciar alguns aspectos relevantes, tais como, padrões de variabilidade, frequência e número de inconformidades, camadas do pavimento mais suscetíveis a erros executivos e características mais propensas a desvios de projeto. O conhecimento dos aspectos elencados pode subsidiar o planejamento das auditorias, bem como a definição do plano de amostragem e dos ensaios laboratoriais a serem realizados visando otimizar as atividades de campo.

Em síntese, os resultados obtidos apontam para a relevância da mensuração contínua, registro e análise da variabilidade no processo construtivo de obras de pavimentação. Para além do caráter



fiscalizatório e/ou punitivo, este conhecimento pode se traduzir em ações de planejamento e aperfeiçoamento dos diferentes atores do setor da infraestrutura de pavimentos no intuito de agregar qualidade ao produto final. Como consequências diretas pode-se citar o incremento na vida útil dos pavimentos, redução dos gastos com retificações, menos interferências nos prazos e custos de execução, redução do consumo de materiais e diminuição das emissões de gases e poluentes.

Por fim, destaca-se que sobretudo por limitação da documentação disponível, não foi possível avançar na investigação das possíveis causas relacionadas às inconformidades do GC e às variações estatisticamente significativas dos desvios padrão semestrais. Entretanto, algumas sugestões para a redução da variabilidade e melhoria do processo construtivo podem ser elencadas. Inicialmente é primordial que as empresas executoras desenvolvam uma cultura organizacional que valorize a gestão da qualidade. Assim, cria-se um ambiente propício para a busca e inserção de diferentes técnicas desde o nível estratégico até o operacional, incluindo por exemplo, o uso de ferramentas estatísticas para monitorar e gerenciar a execução conforme explorado neste trabalho, o que caracteriza o chamado controle estatístico do processo. Especificamente sob a ótica operacional, pode-se sugerir:

- Qualificação contínua do corpo técnico envolvido na supervisão das atividades de compactação;
- Formação regular dos colaboradores responsáveis não só pela compactação da mistura asfáltica, mas também pela usinagem, transporte e espalhamento;
- Minimização do tempo entre o espalhamento da mistura asfáltica e o início de sua compactação;
- Controle rigoroso das temperaturas de usinagem e compactação de acordo com o tipo de ligante asfáltico;
- Manutenção e calibração periódicas dos equipamentos de usinagem, transporte, espalhamento e compactação.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelas bolsas de pesquisa por meio do Programa Cientista Chefe e ao Tribunal de Contas do Estado do Ceará pela colaboração técnica e pela ativa participação no referido Programa.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A.; ELIAN, S.; NOBRE, J. **Modificações e alternativas aos testes de Levene e de Brown e Forsythe para igualdade de variâncias e médias.** Revista Colombiana de Estadística, v. 31, n. 2, p. 241–260, 2008.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Quality Assurance Guide Specification.** Washington, 2003.

BANGA, S. J.; FOX, G. D. **On Bonett's Robust Confidence Interval for a Ratio of Standard Deviations.** In press, 2013.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G. D.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** (2ª ed.). Rio de Janeiro: Abeda, 2022.



DOI: [10.29327/1430212.49-3](https://doi.org/10.29327/1430212.49-3)

**CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DA COMPACTAÇÃO
IN SITU DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 277**: Metodologia para controle estatístico de obras e serviços. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 011 – PRO**: Gestão da qualidade em obras rodoviárias - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

GARVIN, D. A. **Gerenciando a qualidade**: a visão estratégica e competitiva. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1992.

GONÇALVES, B. C. S.; PEREIRA, D. da S.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B. Avaliação da centrífuga rotarex na determinação do teor de ligante e granulometria de diferentes concretos asfálticos. **Transportes**, v. 28, n. 3, p. 75-90, 2020.

KASSEM, H. A.; NAJJAR S. S.; CHEHAB G. R. Probabilistic Modeling of the Inherent Variability in the Dynamic Modulus Master Curve of Asphalt Concrete. **Transportation Research Record**, v. 2576, n. 1, p. 60–71, 2016.

KASSEM, H. A.; NAJJAR S. S.; CHEHAB G. R. Effect of Asphalt Mixture Components on the Uncertainty in Dynamic Modulus Master curves. **Transportation Research Record**, v. 2674, n. 5, p. 135–148, 2020.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES. Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Paris: 2007.

LI, X.; ZHOU, Z.; LV, X.; XIONG, K.; WANG, X.; YOU, Z. Temperature segregation of warm mix asphalt pavement: Laboratory and field evaluations. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 436-445, 2017.

LINDEN, R. N.; MAHONEY, J. P.; JACKSON, N. C. EFFECT OF COMPACTION ON ASPHALT CONCRETE PERFORMANCE. **Transportation Research Record**, n. 1217, 1989. Disponível em: <https://trid.trb.org/View/306988>. Acesso em: 5 jun. 2024

LIU, P.; XU, H.; WANG, D.; WANG, C.; SCHULZE, C.; OESER, M. Comparison of mechanical responses of asphalt mixtures manufactured by different compaction methods. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 765-780, 2018.

LIU, J.; ZHAO, S.; LI, P.; SABOUNDJIAN, S. Variability of composition, volumetric, and mechanic properties of hot mix asphalt for quality assurance. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 3, p. D4015004, 2017.

LIU, Q.; HU, J.; LIU, P.; WU, J.; LEISCHNER, S.; OESER, M. Uncertainty analysis of in-situ pavement compaction considering microstructural characteristics of asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122514, 2021.

MALLICK, R. B. Use of Superpave gyratory compactor to characterize hot-mix asphalt. **Transportation Research Record**, v. 1681, n. 1, p. 86-96, 1999.

MOHAMMAD, L. N.; ELSEIFI, M.; COOPER III, S. B.; RAGHAVENDRA, A. Levels Of Variability In Volumetric And Mechanical Properties Of Asphalt Mixtures. **JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING**, V. 25, N.10, P. 1424-1431, 2013.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. Hoboken: John wiley & sons, 2018.

SANTOS, F. R. T.; SILVA, L. S. V. D.; BASTOS, J. B. D. S.; SOARES, J. B. (2020). **Avaliação de variabilidade de misturas asfálticas aplicadas em um trecho experimental e aplicação de fator de pagamento**. In: Congresso De Pesquisa E Ensino Em Transportes, 34, 2020, 100% digital. ANPET, 2020, p. 1156-1167.



JORGE LUIS SANTOS FERREIRA,
EULLER LOIOLASENA, ELIARDO SOARES COELHO,
JUCELINE BATISTA DOS SANTOS BASTOS, JORGE BARBOSASOARES

SENA, E. L. **Caracterização da variabilidade construtiva de revestimentos asfálticos densos em obras rodoviárias cearenses**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/75401>. Acesso em: 06/04/2024.

SHEWHART, W. A. **Statistical method from the viewpoint of quality control**. New York: Dover Publications, 1939.

SUPERINTENDÊNCIA DE OBRAS PÚBLICAS. **SOP-ES-P 13: Concreto Asfáltico**. Fortaleza, 2019.

TRAN, N.; TURNER, P.; SHAMBLEY, J. **NCAT Report 16-02R ENHANCED COMPACTION TO IMPROVE DURABILITY AND EXTEND PAVEMENT SERVICE LIFE: A LITERATURE REVIEW**. 2016. Disponível em: <https://eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/reports/2016/rep16-02.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2024

VACKOVÁ, P.; VALENTIN J.; KOTOUŠOVÁ A. Impact of lowered laboratory compaction rate on strength properties of asphalt mixtures. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 3, n. 7, p. 1-8, 2017.



UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO E DA CLASSIFICAÇÃO MCT PARA CARACTERIZAR AS LATERITAS UTILIZADAS EM BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE

Felicio G. de Oliveira¹; Eleonardo L. Pereira²; Geraldo L. de Oliveira Marques³; Whilison M. Mendonça²; Tayane A. Fernandes¹; Gabriela J. de Oliveira¹ & Altamir A. Costa¹

RESUMO

O presente trabalho apresenta a avaliação de uma metodologia alternativa para determinação do comportamento laterítico ou não laterítico dos solos tropicais de graduação graúda e para avaliação do grau de nocividade da fração argila destes solos. Inicialmente, três amostras foram analisadas de acordo com os critérios normativos. Em seguida foi utilizada uma metodologia alternativa, baseada no ensaio de adsorção de azul de metileno, para avaliar o grau de nocividade da fração argila, e na classificação MCT, para determinar o caráter laterítico ou não laterítico da fração do solo que passa na peneira nº 10 (2,0 mm). Os resultados mostraram que o ensaio de equivalente de areia não é apropriado para avaliar o grau de nocividade da fração argila dos solos tropicais estudados e que o ensaio de adsorção de azul de metileno é mais adequado para esse fim. A classificação MCT se mostrou eficiente na determinação do caráter laterítico ou não da fração fina dos solos tropicais de graduação graúda. As amostras com comportamento laterítico apresentaram bom desempenho mecânico avaliado por meio do ensaio de ISC, enquanto a amostra com comportamento não laterítico exibiu um baixo desempenho mecânico.

PALAVRAS-CHAVE: Laterita; Adsorção de Azul de Metileno; Classificação MCT; Solo Tropical.

ABSTRACT

The present work presents the evaluation of an alternative methodology for determining the lateritic or non-lateritic behavior of tropical soils of coarse gradation and for evaluating the degree of harmfulness of the clay fraction of these soils. Initially, three samples were analyzed according to normative criteria. An alternative methodology was then used, based on the methylene blue adsorption test, to evaluate the degree of harmfulness of the clay fraction, and on the MCT classification, to determine the lateritic or non-lateritic character of the soil fraction that passed through sieve no. 10 (2.0mm). The results showed that the sand equivalent test is not appropriate to evaluate the degree of harmfulness of the clay fraction in the tropical soils studied and that the methylene blue adsorption test is more suitable for this purpose. The MCT classification proved to be efficient in determining the lateritic character or not of the fine fraction of tropical soils with a coarse gradation. The samples with lateritic behavior showed good mechanical performance evaluated through the ISC test, while the sample with non-lateritic behavior exhibited low mechanical performance.

KEY WORDS: Laterite; Methylene Blue Adsorption; MCT Classification; Tropical Soil.

¹ Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, Superintendência Regional de Minas Gerais, felicio.eraldo@dnit.gov.br; tayane.fernandes@dnit.gov.br; gabriela.oliveira@dnit.gov.br; altamir.costa@dnit.gov.br

² Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Departamento de Engenharia Urbana, Escola de Minas, eleonardo@ufop.edu.br; whilison@ufop.edu.br

³ Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Departamento de Transportes e Geotecnia, geraldo.marques@ufjf.br



INTRODUÇÃO

A norma brasileira DNIT 098 (DNIT, 2007) prescreve que os solos lateríticos de graduação graúda utilizados em base de pavimento apresentem a fração que passa na peneira N° 40 (0,42 mm) com $LL < 40\%$ e $IP < 15\%$ e o equivalente de areia da fração que passa na peneira N° 4 (4,76 mm) $\geq 30\%$. Segundo esta norma, solos lateríticos de graduação graúda são aqueles cuja relação sílica-sesquióxido (Kr) é menor que 2% e que apresentam expansão medida no ensaio de ISC inferior a 0,2%, sendo a argilosidade ou nocividade da fração argila avaliada por meio do ensaio de equivalente de areia. A primeira crítica que deve ser feita à esta norma se refere à utilização do ensaio de equivalente de areia em vez de técnicas mais apropriadas aos solos tropicais brasileiros, podendo citar como exemplo o ensaio de adsorção de azul de metileno. Outra crítica é sobre a utilização da relação sílica-sesquióxidos para definição do caráter laterítico ou não laterítico em detrimento da classificação MCT, que é mais apropriada para a classificação dos solos tropicais (OLIVEIRA, 2023).

Segundo Serra (1987), a utilização do ensaio de equivalente de areia para avaliar a existência de quantidades indesejáveis de silte e argila, pode muitas vezes levar ao abandono de materiais de bom comportamento em base de pavimentos. Esse autor apresentou o resultado do ensaio de equivalente de areia para quatorze amostras de SAFL (solo arenoso fino laterítico), utilizados em rodovias do interior de São Paulo, que apresentaram valores entre 2% e 28%, com média aritmética de 11,1%. Apesar dos baixos valores apresentados de Equivalente de Areia ($< 30\%$), os solos apresentaram bom desempenho ao serem utilizados em bases de pavimentos.

Tradicionalmente a atividade da fração argilosa do solo é calculada de acordo com a proposta de Skempton (1953), pelo índice de atividade do solo, definido como a relação entre o índice de plasticidade e a porcentagem de argila. No entanto, segundo Fabbri (1994), apesar do coeficiente de atividade proposto por Skempton ser determinado para a fração argila, ele incorpora também os defeitos decorrentes da utilização dos limites de Atterberg, que normalmente são inadequados para caracterização dos solos tropicais e apresentam baixa reprodutibilidade. Além disto, esses limites são determinados com a fração que passa na peneira N° 40 (0,42 mm), que normalmente apresenta muito material inerte e não refletem necessariamente a atividade do material fino presente no solo.

Fabbri (1994) propôs que o coeficiente de atividade da fração granulométrica de um solo seja determinado através do ensaio de adsorção de azul de metileno, em função do volume de azul de metileno adsorvido pelo solo e da porcentagem que o solo contém desta fração.

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar uma metodologia alternativa à metodologia prescrita pela norma DNIT 098 (DNIT, 2007) para determinar o comportamento laterítico ou não laterítico dos solos lateríticos de graduação graúda e para avaliar o grau de nocividade da fração argila destes solos, que não seja fundamentada na determinação da relação molecular sílica-sesquióxidos (Kr) e nos resultados de ensaio de equivalente de areia.

A partir do objetivo geral descrito acima, foram traçados os seguintes objetivos específicos: Avaliar a utilização do ensaio de adsorção de metileno para a definição do grau de atividade da fração argila dos solos lateríticos de graduação graúda; avaliar a utilização da Classificação MCT para a determinação do caráter laterítico ou não laterítico da fração fina que passa na peneira N° 10 (2,0 mm) dos solos lateríticos de graduação graúda.



DOI: 10.29327/1430212.49-1

UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO E DA CLASSIFICAÇÃO MCT
PARA CARACTERIZAR AS LATERITAS UTILIZADAS EM BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE

REFERENCIAL TEÓRICO

Adsorção de Azul de Metileno

Segundo Casanova (1986), Fabbri e Sória (1991), Pejon (1992), Fabbri (1994) e Bonini (2005), o ensaio de adsorção de azul de metileno é uma alternativa rápida e eficiente para a caracterização e classificação dos solos tropicais brasileiros.

O ensaio de azul de metileno pelo método da mancha consiste na titulação de uma suspensão de solo + água com uma solução de azul de metileno (corante) padronizada em meio intensamente agitado. Após adição de uma quantidade inicial conhecida de corante na solução solo + água, retira-se uma gota da solução solo + água + corante, que é pingada em um papel filtro padronizado. Se a figura formada pela difusão da gota no papel apresentar uma aura azulada ao redor do núcleo, significa que há excesso de corante e que ocorreu o ponto de viragem, caso contrário adiciona-se outra quantidade de corante e repete-se o teste da mancha até atingir o ponto de viragem. A partir da quantidade adicionada de corante pode-se calcular a superfície específica (SE) e, conseqüentemente a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo analisado (FABBRI, 1994). A Figura 1 mostra detalhes do ensaio de azul de metileno pelo método da mancha.

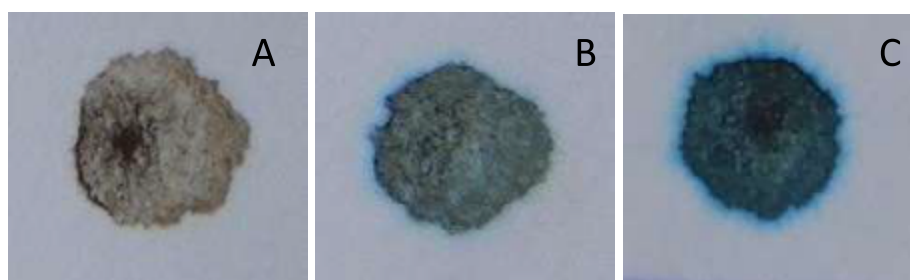


Figura 1. Detalhes do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha: a) Início do ensaio; B) Início da formação da mancha azulada no papel filtro; C) Final do ensaio, após o surgimento da mancha azul no ponto de viragem (OLIVEIRA *et al.*, 2023)

De acordo com Fabbri (1994), o Valor de Azul (V_a) e o Coeficiente de Atividade (CA) devem ser calculados por meio das Equações 1 e 2, respectivamente. Na Equação 1, V_a corresponde ao volume total em mililitros de Azul de Metileno consumido por 1 g de amostra de solo integral, enquanto V é o volume total de Azul de Metileno adicionado à suspensão durante o ensaio em mililitros. P_{200} é a porcentagem do solo que passa na peneira N° 200 (0,075 mm) e w é o teor de umidade do solo imediatamente antes do início do ensaio. Na Equação 2, o coeficiente de atividade (CA) é calculado em função da porcentagem da fração do solo, em peso, que se deseja avaliar a atividade (P_F) e do Valor de Azul (V_a).

$$V_a = V \times \frac{P_{200}}{100} \times \left(1 + \frac{w}{100}\right) \quad (1)$$

$$CA = 100 \times \frac{V_a}{P_F} \quad (2)$$

De acordo com Fabbri (1994), existem três graus de atividade para os grupos de argilominerais em função de seus coeficientes de atividade (CA): a) muito ativos ($CA > 80$), que abrangem os



argilominerais dos grupos das montmorillonitas e vermiculitas; b) ativos ($11 < CA < 80$), que abrangem os argilominerais dos grupos das caulinitas e/ou ilitas, e; c) pouco ativos ($CA < 11$), que abrangem os materiais inertes e os argilominerais laterizados. A partir desses valores, esse autor propôs um ábaco do tipo porcentagem de argila *versus* volume de azul (Va) que permite enquadrar o solo estudado em um dos três graus de atividade propostos.

Classificação MCT

De acordo com Nogami e Villibor (1995), o excelente desempenho apresentado por diversas pistas experimentais executadas com base de solos arenosos finos lateríticos, construídas pelo DER-SP na década de 60, comprovou as limitações dos critérios tradicionais de caracterização e classificação de solos para a seleção de materiais de base de pavimento, em regiões tropicais. Mesmo não atendendo aos critérios tradicionais, elas apresentavam um bom desempenho quanto à resistência e à durabilidade. Segundo estes autores, isto mostrou a necessidade de se desenvolver critérios de classificação mais apropriados, não relacionados demasiadamente às propriedades índices tradicionais, porém mais ligados às propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos compactados.

No início da década de 80, os engenheiros Douglas Fadul Villibor e Job Shuji Nogami desenvolveram uma nova sistemática que passou a ser denominada tecnologia MCT (M - miniatura; C - compactado; T - tropical) e inclui também uma nova classificação de solos tropicais, denominada classificação MCT. Esta classificação é obtida a partir da execução dos ensaios de compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão, e divide os solos em dois grupos: Lateríticos (L) ou Não lateríticos (N), com as seguintes subdivisões entre eles: areia (A), arenoso (A'), silteoso (S') e argiloso (G').

MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras foram coletadas na região do Triângulo Mineiro, nos locais indicados na Tabela 1, e transportados para os laboratórios do Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto (NUGEO/UFOP).

Tabela 1. Localização das jazidas

Jazida	Material	Cidade	Coordenadas
ROM1	Laterita	Romaria/MG	18°54'55.4"S 47°36'08.6"W
CRM2	Laterita	Coromandel/MG	18°31'03.5"S 47°13' 03.7"W
ABAD	Solo de graduação graúda com seixos	Abadia dos Dourados /MG	18°19'15.8"S 47°30'48.0"W

Todas as amostras foram secas ao ar e em seguida separadas em três frações por meio de um agitador mecânico, da seguinte forma: a) material retido na peneira $\frac{3}{4}$ "; b) material que passa na peneira de $\frac{3}{4}$ " e fica retido na peneira nº 4 (4,76 mm) e; c) material que passa na peneira nº 4 (4,76 mm). Cada uma dessas frações foi pesada separadamente e a proporção entre elas foi mantida para a montagem de todas as amostras utilizadas para a execução dos ensaios.



DOI: [10.29327/1430212.49-1](https://doi.org/10.29327/1430212.49-1)

UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO E DA CLASSIFICAÇÃO MCT PARA CARACTERIZAR AS LATERITAS UTILIZADAS EM BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE

Após a preparação das amostras, elas foram submetidas aos seguintes ensaios exigidos pela norma DNIT 098 (DNIT, 2007): análise granulométrica – NBR 7181 (ABNT, 2016c), limite de liquidez – NBR 6459 (ABNT, 2016a), limite de plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 2016b), e equivalente de areia – DNER-ME 054 (DNER, 1997). A relação sílica-sesquióxidos (Kr), para as amostras ROM1 e CRM2, foi determinada de acordo a norma DNER-ME 30 (DNER, 1994), nos laboratórios de Traços Metálicos e de Via Úmida Inorgânica do SENAI/FIEMG-MG, e para a amostra ABAD, foi realizada de acordo com o método de ataque sulfúrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017), no laboratório do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP. Para avaliação do desempenho mecânico dos materiais, foram realizados os ensaios de compactação com a energia do Proctor Modificado, segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2016d) e Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão, norma NBR 9895 (ABNT, 2016e).

Após a caracterização das amostras, foi possível observar que todas elas apresentaram baixos valores de equivalente de areia, o que motivou a utilização de uma metodologia alternativa para avaliação do grau de nocividade da fração argila através do ensaio de Adsorção de Azul de Metileno, norma NBR 14949 (ABNT, 2017), utilizando as amostras secas ao ar conforme foi sugerido por Fabbri (1994).

Para permitir a classificação MCT, foram executados os ensaios de compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão, DNIT-ME 258 (DNIT, 2023a). A classificação foi realizada de acordo com a norma DNIT-CLA 259 (DNIT, 2023b).

O teor de matéria orgânica foi determinado no Departamento de Ciência do Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV), de acordo com os procedimentos do Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (TEIXEIRA, *et al.*, 2017), e o ensaio de expansibilidade foi realizado de acordo com os procedimentos da norma DNIT-ME 160 (DNIT, 2012), no laboratório de Pavimentos do NUGEO/UFOP.

RESULTADOS E ANÁLISES

Análise Granulométrica

Conforme pode ser visualizado na Figura 2, que apresenta as curvas granulométricas das três amostras estudadas, todas as amostras se enquadraram na Faixa A da norma DNIT 098 (DNIT, 2007), no entanto a porcentagem passante na peneira N° 200 (0,075 mm) foi maior que 2/3 do material passante na peneira N° 40 (0,42 mm), o que não é permitido por essa norma, e, portanto, necessitam de ajustes na distribuição granulometria para serem utilizadas em base de pavimento.

Os valores de massa específica dos grãos foram de 2,468 g/cm³ na amostra ABAD, 2,745 g/cm³ na amostra CRM2 e 2,807 g/cm³ na amostra ROM1.



FELICIO GERALDO DE OLIVEIRA, ELEONARDO LUCAS PEREIRA,
GERALDO LUCIANO DE OLIVEIRAMARQUES, TAYANE APARECIDA FERNANDES,
GABRIELA JÚVIA DE OLIVEIRA, ALTAMIR AUGUSTOCOSTA, WHILISON MARQUES MENDONÇA

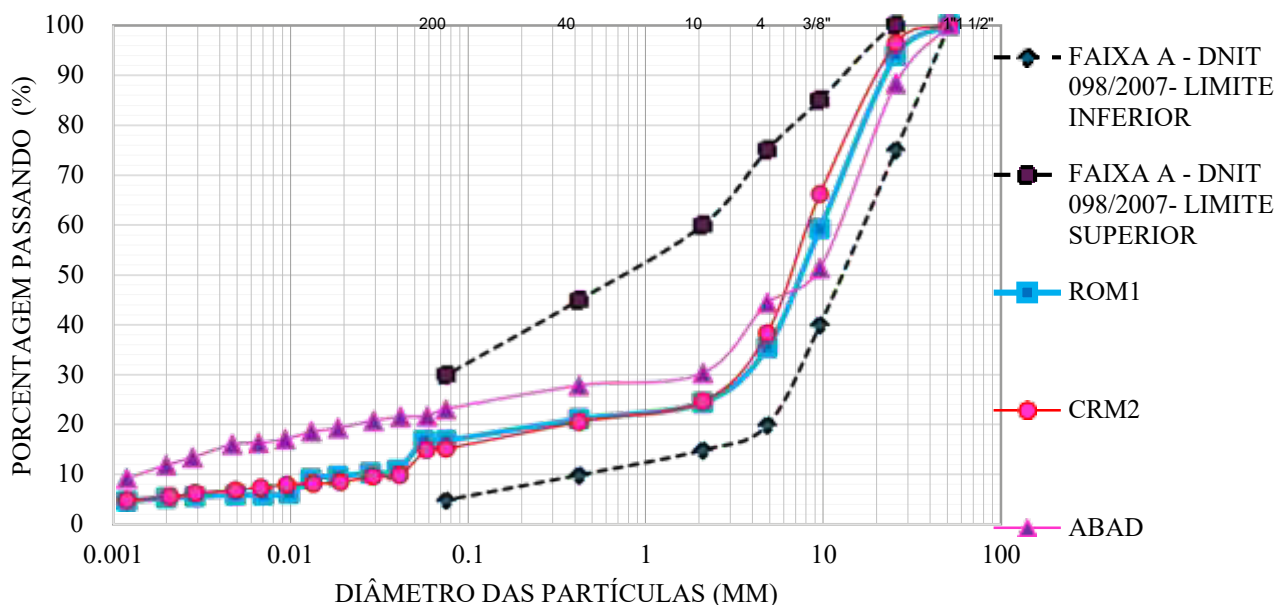


Figura 2. Curvas Granulométricas das amostras

LL, LP e Equivalente de Areia

A Tabela 2 mostra os resultados do limite de liquidez, índice de plasticidade e equivalente de areia das amostras.

Tabela 2. LL, LP e Equivalente de Areia			
Amostra	ROM1	CRM2	ABAD
LL (%)	33	36	42
IP (%)	10	13	13
Equivalente de Areia (%)	15	22	27

Conforme pode ser observado na Tabela 2, a amostra ABAD apresentou limite de liquidez acima do limite prescrito pela norma DNIT 098 (DNIT, 2007), ($LL \leq 40\%$), mas as amostras ROM1 e CRM2 apresentaram valores menores que 40%, conforme exigido pela citada norma. Os valores de índice de plasticidade (IP) foram menores que 15% para as 3 amostras, dentro dos limites de aceitação da norma. Quanto aos valores de equivalente de areia, todas as amostras apresentaram baixos valores, menores que 30%, e deveriam ser descartadas, pois a segundo a norma DNIT 098 (DNIT, 2007), os solos lateríticos de graduação graúda utilizados em base devem apresentar equivalente de areia maior que 30%.



DOI: 10.29327/1430212.49-1

UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO E DA CLASSIFICAÇÃO MCT
PARA CARACTERIZAR AS LATERITAS UTILIZADAS EM BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE

Compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de Compactação, ISC e expansão medida no ensaio ISC das amostras.

Tabela 3. Compactação, ISC e Expansão das amostras

Material	ROM1	CRM2	ABAD
ISC (%)	165,0	145,0	29,0
Expansão (%)	0,01	0,05	0,5
W ₀ (%)	9,0	9,0	10,6
ρ _{d,max} (g/cm ³)	2227,0	2162,0	2025,0

Conforme pode ser observado na Tabela 3, as amostras ROM1 e CRM2 apresentaram valores de ISC maiores que 80% e valores de expansão menores que 0,2%, que indicam o bom desempenho mecânico dessas amostras. No entanto, para a amostra ABAD os resultados apontam para um mal desempenho mecânico, com ISC igual a 29%, expansão igual a 0,5% e expansibilidade igual a 12% (Tabela 6), características que impossibilitam a sua utilização em base de pavimento.

Adsorção de Azul de Metileno

São apresentados na Tabela 4 e Figura 3 os resultados do ensaio de adsorção de azul de metileno das amostras estudadas. Para a realização deste ensaio foram separadas as amostras formadas pelo material que passa na peneira N° 4 (4,76 mm), da mesma forma que é feito no ensaio de equivalente de areia, desta forma as porcentagens de argila de cada amostra foram calculadas em função destas amostras.

Tabela 4. Adsorção de Azul de Metileno

Amostra	ROM1	CRM2	ABAD
Va* (ml/g)	1,0	1,3	2,2
Porcentagem de argila na amostra **(%)	31,1	34,0	31,8
Grau de Atividade	Pouco Ativo	Pouco Ativo	Pouco Ativo

* Valor de Azul para cada 1g de fração argila

** Amostra formada pela fração que passa na peneira n° 4 (4,76 mm)

Conforme visualizado na Tabela 4 e Figura 3, todas as amostras foram classificadas como “Pouco Ativo”, indicando uma baixa influência dos argilominerais presentes na fração argila dessas amostras, ou seja, que elas possuem uma fração argila constituída por minerais que em conjunto apresentam uma baixa atividade, equivalente à atividade dos solos lateríticos.



FELICIO GERALDO DE OLIVEIRA, ELEONARDO LUCAS PEREIRA,
GERALDO LUCIANO DE OLIVEIRAMARQUES, TAYANE APARECIDA FERNANDES,
GABRIELA JÚVIA DE OLIVEIRA, ALTAMIR AUGUSTOCOSTA, WHILISON MARQUES MENDONÇA

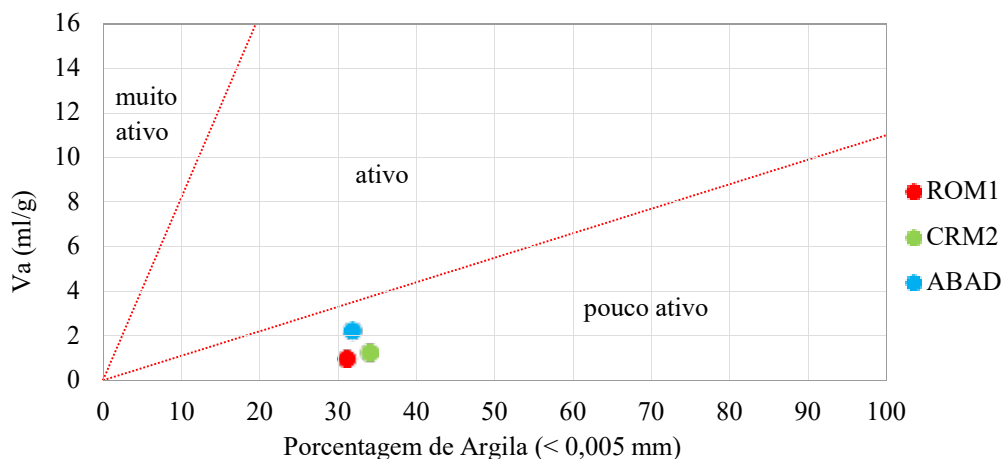


Figura 3. Porcentagem de argila das amostras versus valores de azul

Relação Sílica Sesquióxidos e Classificação MCT

A Tabela 5 apresenta os resultados da relação sílica-sesquióxidos (Kr), da expansibilidade e do teor de matéria orgânica das 3 amostras.

Tabela 5. Relação sílica sesquióxidos (Kr), Expansibilidade e Teor de Matéria Orgânica

Amostra	ROM1	CRM2	ABAD
Relação sílica sesquióxidos (Kr)	1,23	0,89	1,16
Expansibilidade (DNIT 160/2012-ME)	3,97	6,33	12,0
Matéria orgânica (%)	0,65	1,32	2,8

Segundo a norma DNIT 098 (DNIT, 2007), entende-se como solos lateríticos de graduação gráuda aqueles cuja relação molecular sílica-sesquióxido (Kr) é menor que 2% e que apresentam expansão medida no ensaio de ISC inferior a 0,2%. Para os casos de expansão medida no ensaio de ISC compreendida no intervalo $0,2\% < \text{expansão (ISC)} < 0,5\%$, admite-se valores de expansibilidade (DNIT 160/2012-ME) menores que 10%.

As amostras ROM1 e CRM2 apresentaram Kr menor que 2% (Tabela 5) e expansão medida no ensaio de ISC menor que 0,2% (Tabela 3), portanto, segundo o prescrito pela norma DNIT 098 (DNIT, 2007), elas foram classificadas como solos lateríticos de graduação gráuda. Para o caso da amostra ABAD, pode-se observar que ela apresentou Kr menor que 2% (Tabela 5) e expansão maior que 0,2% (Tabela 3), e em função disto foi necessário analisar o resultado do ensaio de expansibilidade, norma DNIT160/2012-ME (DNIT 2012), que apresentou valor de 12% (maior que 10%), e portanto esta amostra foi classificada como solo não laterítico de graduação gráuda, que não se enquadra no grupo de solos tratados na norma DNIT 098 (DNIT, 2007).



DOI: 10.29327/1430212.49-1

UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO E DA CLASSIFICAÇÃO MCT
PARA CARACTERIZAR AS LATERITAS UTILIZADAS EM BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE

A Tabela 6 e a Figura 4 apresentam os resultados da classificação MCT das amostras.

Tabela 6. Classificação MCT

Amostra	ROM1	CRM2	ABAD
e'	0,66	0,68	1,25
c'	1,71	1,56	1,83
Pi	7,0	4,0	78,0
Classificação MCT	LG'	LG'	NG'

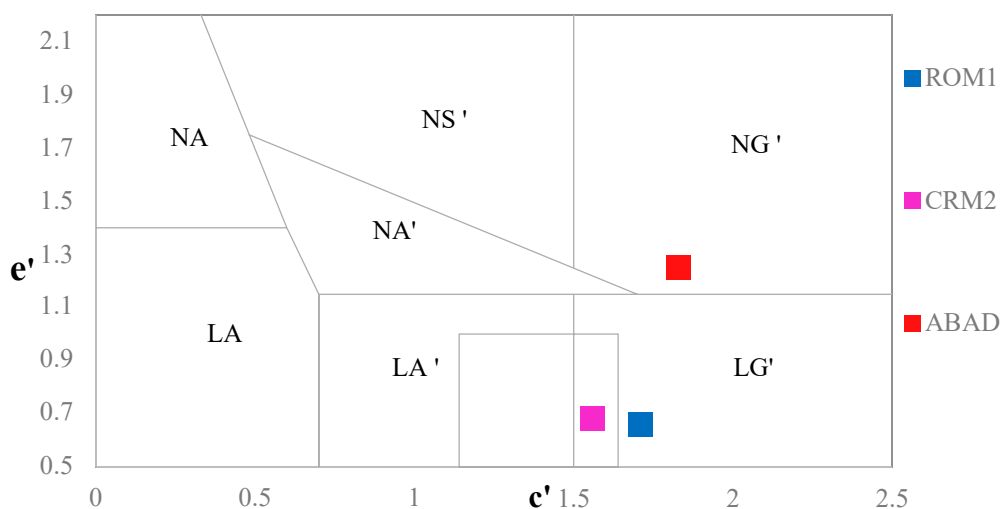


Figura 4. Classificação MCT das amostras

Conforme pode ser observado na Tabela 6 e Figura 4, as amostras ROM e CRM2 foram classificadas como LG', comportamento laterítico argiloso, e a amostra ABAD como NG', comportamento não laterítico argiloso.

É importante destacar que a amostra ABAD, com comportamento não laterítico, apresentou o teor de matéria orgânica de 2,8% (Tabela 5), muito maior que as amostras ROM1 (0,65%) e CRM2 (1,32%), que apresentaram comportamento laterítico. Segundo Pejon (1992), a matéria orgânica não adsorve o azul de metileno, portanto no caso da amostra ABAD a adsorção de azul de metileno indica apenas a atividade dos minerais da amostra, que se mostrou baixa conforme pode ser visualizado na Figura 3, sem considerar a atividade da matéria orgânica que normalmente é mais alta.

Discussão a Respeito dos Resultados da Adsorção de Azul de Metileno e do Equivalente de Areia

Como pode ser visualizado na Tabela 3, todas as três amostras, ROM1, CRM2 e ABAD, apresentaram valores de Equivalente de Areia menores que 30%, portanto todas elas deveriam ser descartadas. No entanto, conforme pode ser observado na Tabela 4 e Figura 3, o resultados dos ensaios de adsorção de metileno indicaram que as três amostras apresentaram uma fração argila "pouco ativa", ou seja, não apresentam um conjunto de minerais que possam resultar em acentuado efeito nocivo ao pavimento devido a presença da água e portanto, não precisam ser descartados devido ao risco de nocividade da fração fina, conforme seria necessário caso fosse adotado o critério de descartar os solos com equivalente de areia menor que 30%.



Estes resultados mostram que o ensaio de adsorção de azul de metileno é mais apropriado que o ensaio de equivalente de areia para a identificação do grau de argilosidade ou de nocividade da fração argila, visto que, apesar dos baixos valores de equivalente de areia, os resultados do ensaio de Adsorção de Azul de Metileno indicaram uma fração argila “pouco ativa”, que permite inferir o seu bom comportamento na camada de pavimento.

Discussão a Respeito dos Resultados da Classificação MCT e dos Resultados Obtidos Através do Critério de Determinação do Caráter Laterítico Adotado pela Norma DNIT 098/2007

Conforme pode ser observado na Tabela 6 e Figura 4, segundo a classificação MCT, as amostras ROM1 e CRM2 foram classificadas como LG' (comportamento laterítico argiloso) e a amostra ABAD como NG' (comportamento não laterítico argiloso). Portanto, as amostras ROM1 e CRM2 poderiam ser analisadas para a utilização em base de solo laterítico de graduação graúda, por terem apresentado a fração que passa na peneira N° 10 (2,0 mm) com comportamento LG', mas a amostra ABAD, que foi apontada com comportamento não laterítico (NG'), teria que ser tratada como solo não laterítico, que não se enquadra nos critérios da norma DNIT 098 (DNIT, 2007).

Pode-se perceber que, através de outros critérios, a norma DNIT 098 (DNIT, 2007) permitiu alcançar-se resultados semelhantes aos obtidos por meio da classificação MCT. Segundo esta norma, as amostras ROM1 e CRM2, devido aos valores de Kr menores que 2% e de expansão medida no ensaio de ISC menores 0,2%, foram definidas como solo laterítico, enquanto a amostra ABAD, com expansão de 0,5% e expansibilidade de 12%, apesar de ter apresentado Kr menor que 2%, foi definida como solo não laterítico.

É oportuno ressaltar que apesar dos resultados obtidos pelas duas metodologias terem sido semelhantes, para a classificação MCT foram necessários dois ensaios, a compactação Mini-MCV seguida da perda de massa por imersão, enquanto para a determinação do caráter laterítico ou não laterítico pelos procedimentos da norma DNIT 098 (DNIT, 2007) foram necessárias várias análises químicas para determinação da relação sílica-sesquióxidos, além dos ensaios de compactação, ISC, expansão medida no ensaio de ISC e de expansibilidade. Outro detalhe a favor da classificação MCT é a baixa quantidade de solo necessário para a execução dos ensaios devido à utilização de corpos de prova com dimensões reduzidas neste método.

CONCLUSÕES

De acordo com a metodologia prescrita na norma DNIT 098 (DNIT, 2007), que trata da execução da camada de base de pavimento estabilizada granulometricamente com solos lateríticos de graduação graúda, deve-se utilizar o ensaio de equivalente de areia, para a avaliação da nocividade da fração argila, e a relação molecular sílica-sesquióxidos (Kr), para a determinação do comportamento laterítico ou não laterítico das amostras. Por outro lado, o presente trabalho buscou avaliar uma metodologia alternativa, na qual o comportamento laterítico ou não laterítico é determinado pela classificação MCT e o grau de nocividade da fração argila é avaliado pelo ensaio de adsorção de azul de metileno.

As três amostras de solos de graduação graúda estudadas apresentaram valores de equivalente de areia menores que 30%, portanto, deveriam ser descartadas, segundo os critérios da norma DNIT 098 (DNIT, 2007).



DOI: [10.29327/1430212.49-1](https://doi.org/10.29327/1430212.49-1)

UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO E DA CLASSIFICAÇÃO MCT
PARA CARACTERIZAR AS LATERITAS UTILIZADAS EM BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE

Estes resultados mostraram que o ensaio de equivalente de areia não é adequado para avaliar o grau de nocividade da fração argila dos solos tropicais estudados, e que o ensaio de adsorção de azul de metileno é mais adequado para esse fim. Dessa forma, quando os resultados do equivalente de areia forem menores que os 30% exigidos pela norma DNIT 098 (DNIT, 2007), a amostra deverá ser submetida ao ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, prevalecendo o critério do azul de metileno, ou seja, se o azul de metileno indicar que a fração argila é “Pouco Ativa” a amostra pode ser utilizada, ao contrário, se o azul de metileno indicar que a fração argila é “Ativa” ou “Muito Ativa” ela deve ser rejeitada.

A classificação MCT permitiu obter os mesmos resultados obtidos pelos critérios de determinação do caráter laterítico ou não laterítico adotados pela norma DNIT 098 (DNIT, 2007). No entanto, a metodologia MCT exige menor quantidade de solo e menor número de ensaios, além de não necessitar da realização das análises químicas que o método da citada norma exige para a determinação da relação sílica-sesquióxidos.

Estes resultados apontam para a importância da classificação MCT da fração que passa na peneira N° 10 (2,0 mm) dos solos lateríticos de gradação graúda, que mostrou-se apropriada para determinação do caráter laterítico ou não laterítico dos solos lateríticos de gradação graúda, e para importância do ensaio de adsorção de azul de metileno, que se mostrou mais apropriado que o ensaio de equivalente de areia para a avaliação do grau de nocividade ou de atividade da fração argila dos solos lateríticos de gradação graúda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: 2016a.
- _____. **Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7180: 2016b.
- _____. **Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181. 2016c.
- _____. **Solo — Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182. 2016d.
- _____. **Solo — Índice de Suporte Califórnia**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895. 2016e.
- _____. **Microrrevestimentos asfálticos — Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul de metileno**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14949. 2017.
- BONINNI, A. O., **Proposta de um método de ensaio para determinação do volume de azul de metileno adsorvido pela fração fina de solos tropicais**. 2005. 141 f. Dissertação de Mestrado, USP, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2005.
- CASANOVA, F. J., O ensaio de Azul de Metileno na caracterização de solos lateríticos. In: ABPv. REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. XXI, 1986. **Anais ...** Salvador: 1986. V2, p. 276-286.
- DNER. **Solos – Determinação das relações sílica-alumina e sílica-sesquióxidos**. Rio de Janeiro: DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 030/94: 1994.
- _____. **Equivalente de areia**. Rio de Janeiro: DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 054/97: 1997.
- DNIT. **Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico**. Rio de Janeiro: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 098/2007- ES: 2007.
- _____. **Solos – Determinação da expansibilidade**. Rio de Janeiro: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-



ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 160/2012: 2012.

_____. **Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão**: Brasília: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME 258/2023: 2023a.

_____. **Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura**. Brasília: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-CLA 259/2023: 2023b.

FABBRI, G. T. P., SÓRIA, M. H. A.; Aplicação do ensaio de Azul de Metileno à classificação – Uma primeira aproximação. In: ABPv. REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. XXV, 1991. **Anais ...** São Paulo: 1991. p. 381-399.

FABBRI, G. T. P., **Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno**. 1994. 162 f. Tese de Doutorado. USP, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1994.

OLIVEIRA, F. G. Estudo da estabilização granulométrica de lateritas com uso de solos do triângulo mineiro. Tese de Doutorado. Prog. Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, 2023.

OLIVEIRA, F. G.; PEREIRA, E. L.; MARQUES, G. L. O.; MENDONÇA, W. M. Linear shrinkage and the methylene blue spot test in the analysis of plasticity of granulometrically stabilized laterites. **REM - International Engineering Journal**, Fundação Gorceix, v. 76(3), p. 255–263, 2023.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D.F., **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. v. 1 e v. 2., São Paulo: Editora Villibor, 1995.

PEJON, O. J., **Mapeamento geotécnico regional da Folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos**. 1992. 141 f. Tese de Doutorado, USP, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1992.

SERRA, P. R. M., **Considerações sobre mistura de solo-agregado com solos finos lateríticos**. 1987. 106 f. Dissertação de Mestrado. USP, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1987.

SKEMPTON, A. W., The Colloidal Activity of Clays. **Proc. 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING**, Zurich, 1953.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**, 3ª Edição revisada e ampliada. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Sol Brasília/DF. 577 p. 2017.

Realização



Patrocínio

/// TOP MASTER ///

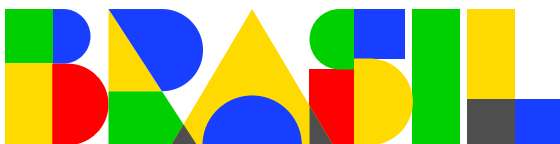


PETROBRAS

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES

GOVERNO FEDERAL



UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

strata
ENGENHARIA

/// MASTER ///



softplan
setor público



LISY
SEGURANÇA VIÁRIA



/// VIP ///



STRATURA

TRAÇADO
Distribuidora de Asfalto

/// VIP ESPECIAL ///



MINAS GERAIS

GOVERNO DIFERENTE. ESTADO EFICIENTE.



/// SUPREME ///



/// PLUS ///



/// APOIO INSTITUCIONAL ///



WORLD BANK GROUP



ENTIDADES APOIADORAS

