



## 26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

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

*Vanessa Rebouças Santana<sup>1</sup>; Mario Sergio de Souza Almeida<sup>2</sup>; Weiner Gustavo Silva Costa<sup>2</sup>;  
Maria do Socorro Costa São Mateus<sup>1</sup>; Ítalo Miller Machado Pereira<sup>1</sup> & Acbal Rucas Andrade  
Achy<sup>2</sup>*

#### 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.

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Feira de Santana, PPGECEA-DTEC, e-mail: vanessarseng@gmail.com; socorro@uefs.br; italomillermachado@hotmail.com.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, e-mail: mario.almeida@ufrb.edu.br; weiner@ufrb.edu.br; acbal@ufrb.edu.br.



## 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 a 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



material foi coletado, após umedecimento e homogeneização, na projeção vertical das janelas J01 e J02 abertas na etapa de sondagem preliminar.

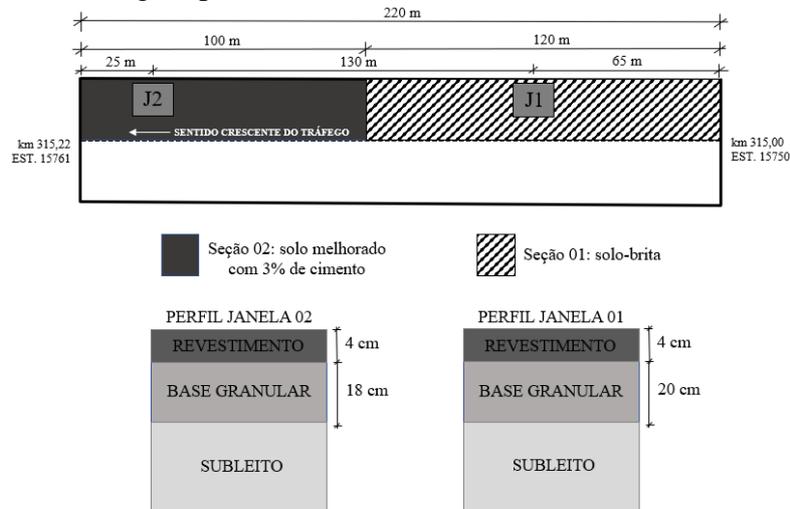


Figura 1 - Esquema representativo das janelas abertas no pavimento e seus perfis (sondagem preliminar)

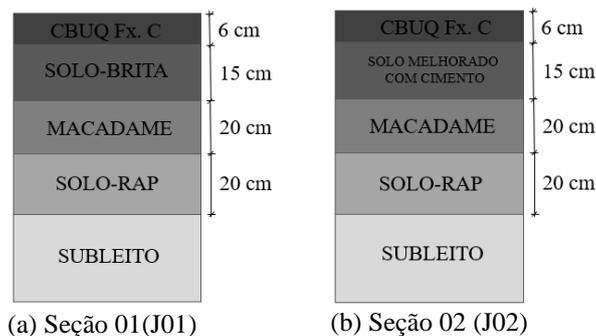


Figura 2 - Seções experimentais do presente estudo (após a reconstrução do pavimento)

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.

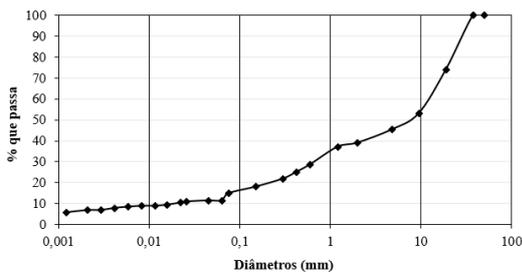
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização geotécnica

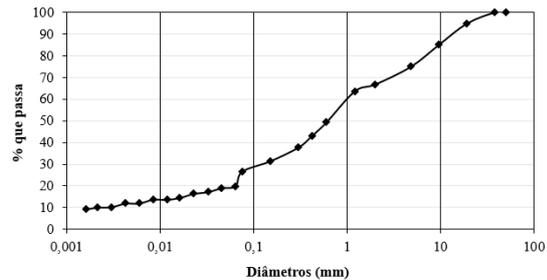
A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas obtidas para cada material. Observa-se que o solo de subleito da seção 02 possui um maior percentual de finos (34,8%), quando comparado ao subleito da seção 01 (19,2%). Para a camada resultante da reciclagem, um solo-RAP com



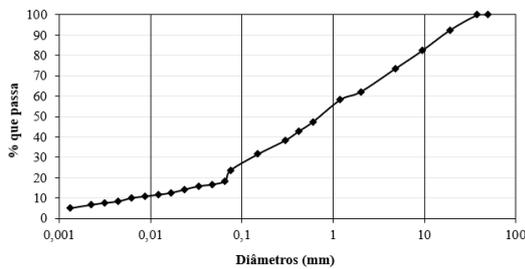
aproximadamente 80% do solo da base e 20% de revestimento asfáltico existente, nota-se que a composição dos materiais de reforço de subleito apresenta valores idênticos para os percentuais de areia média e silte. Quanto aos materiais de base, a base solo-brita possui um maior percentual de pedregulho (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%).



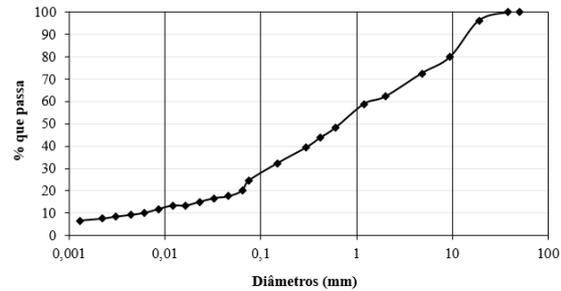
(a) Base – Seção 01



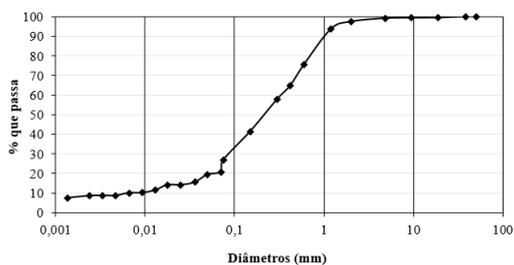
(b) Base – Seção 02



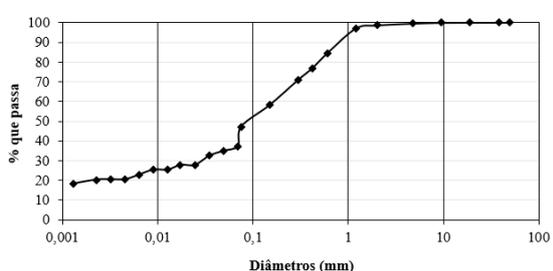
(c) Reforço do Subleito - Seção 01



(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 (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_{ot}$ (%)	TRB	$c'$	$d'$	Pi (%)	$e'$	Classificação MCT
Seção 01 Base	-	-	NP	2,74	2,31	5,7	-	-	-	-	-	-
Seção 01 Reforço	-	-	NP	2,65	2,10	5,3	-	-	-	-	-	-
Seção 01 Subleito	-	-	NP	2,62	2,00	9,0	A-2-4	0,73	53,4	103	1,12	LA'
Seção 02 Base	-	-	NP	2,71	2,07	7,9	-	-	-	-	-	-
Seção 02 Reforço	-	-	NP	2,67	2,24	6,3	-	-	-	-	-	-
Seção 02 Subleito	33	21	12	2,69	1,78	15,0	A-6	1,98	133,7	60	0,91	LG'

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



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 <sub>médio</sub> (MPa)	Constantes de regressão			
			k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>
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.

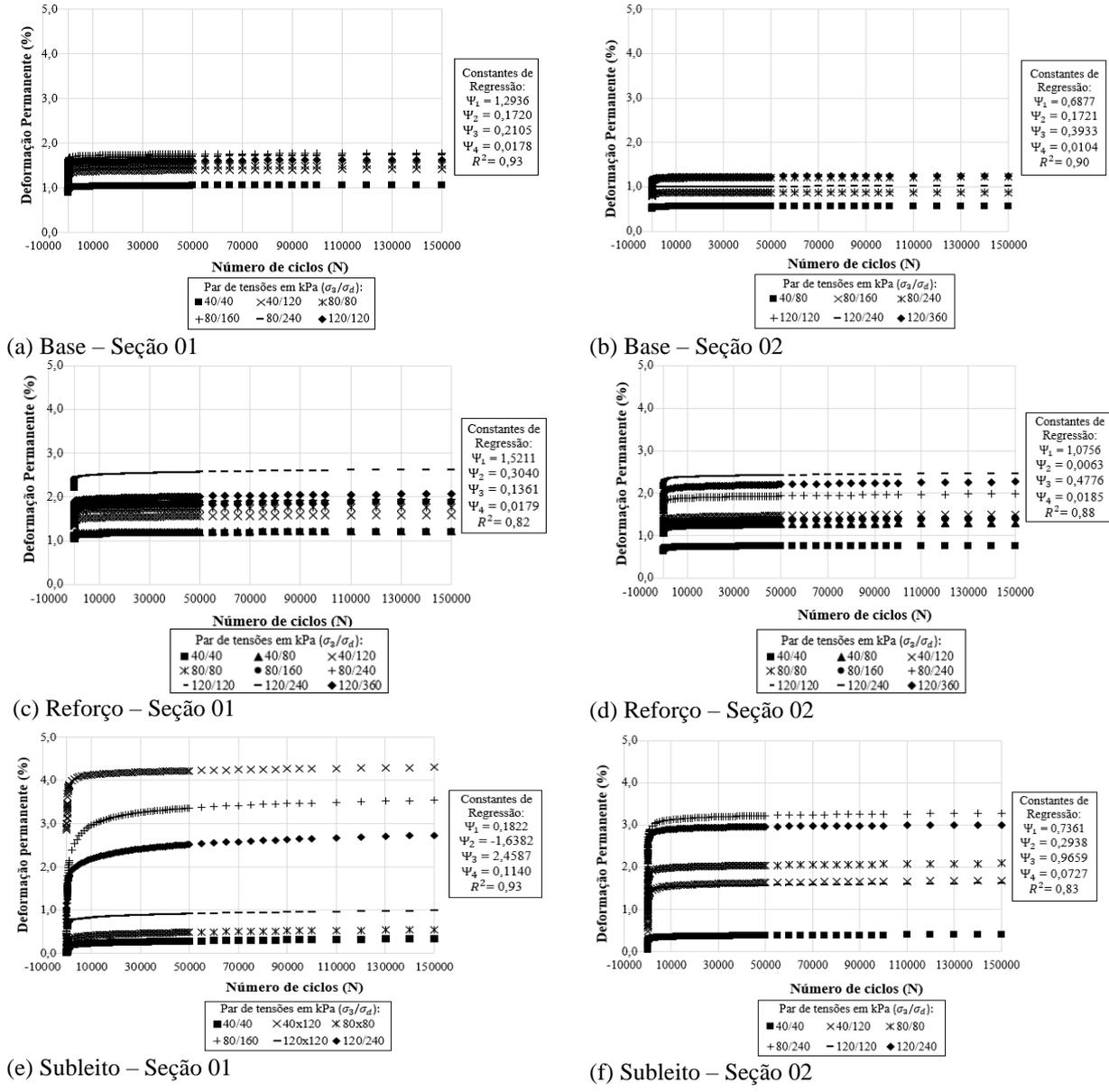


Figura 4 – Gráficos de DP para os materiais depois da reconstrução

**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 microregião 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 de 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.



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.