

19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV) E AVALIAÇÃO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA (ACCV) DE PAVIMENTOS ASFÁLTICO E DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND POR MEIO DA QUANTIFICAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÃO DE CO₂: ANÁLISE COMPARATIVA

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Alice Amorim Teles¹; Leandro Modesto Prates Beltrão¹; Álvaro Teixeira de Paiva²; Sandra Patricia Echeverria Fernandez² & Michele Tereza Marques Carvalho³

RESUMO

A qualidade da infraestrutura de transportes está atrelada ao desenvolvimento socioeconômico independentemente do país. Dada a relevância de o progresso social e econômico ser planejado sob a ótica da sustentabilidade ambiental, a viabilidade de investimentos no setor da infraestrutura de transportes também deve considerar aspectos ambientais. Nesse contexto, a presente pesquisa propõe-se a avaliar o consumo energético, a emissão de CO₂ e o preço de construção e de manutenção de pavimentos asfálticos e de concreto de cimento Portland por meio das ferramentas Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (ACCV). Para tanto, o método proposto divide-se em três etapas: (1) definição das estruturas dos pavimentos e soluções de manutenção, (2) cálculo do consumo energético e emissão de CO₂ e (3) cálculo dos preços de construção e manutenção dos pavimentos. O método baseia-se em parâmetros referenciais do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) e do Custo Médio Gerencial (CMG) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Dentro das condições de contorno delineadas neste estudo, o pavimento de concreto de cimento Portland apresentou melhor desempenho em termos ambientais e econômicos. A presente pesquisa contribui para a inclusão da pauta ambiental na tomada de decisão de investimentos de infraestrutura de transportes, além de apresentar um método replicável aos mais variados contextos.

PALAVRAS-CHAVE: avaliação do ciclo de vida; avaliação do custo do ciclo de vida; emissão de CO₂; consumo energético; pavimentos.

ABSTRACT

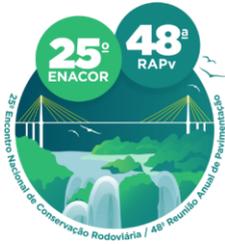
The quality of transport infrastructure is related to socioeconomic development regardless of the country. Due the importance of planning social and economic progress from the perspective of environmental sustainability, the viability of transport infrastructure investments should also consider environmental aspects. In this context, the present research aims to evaluate energy consumption, carbon dioxide emissions and construction and maintenance costs of both asphalt and Portland cement concrete pavements, using Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost Assessment (LCCA) techniques. In order to achieve this goal, the method proposed in the study is divided into three steps: (1) definition of pavement structures and maintenance solutions, (2) calculation of energy consumption and carbon dioxide emissions and (3) construction and maintenance cost estimation of pavements. The method is based on reference parameters encompassed by Reference Cost System for Construction Works (SICRO) and Average Reference Costs (CMG), both developed by the National Department of Transport Infrastructure (DNIT). Under the threshold outlined in this study, Portland cement concrete pavement exhibited better performance in terms of environmental and economic factors. This research contributes to the inclusion of environmental matters in the decision-making process of transport infrastructure investments. In addition, it presents a replicable method for other contexts.

KEY WORDS: life cycle analysis; life cycle cost analysis; CO₂ emission; energy consumption; pavements.

¹ Universidade de Brasília e Fundação Getulio Vargas - Instituto Brasileiro de Economia, alice.a.teles@gmail.com; leandro.beltrao@fgv.br.

² Fundação Getulio Vargas - Instituto Brasileiro de Economia, alvaro.paiva@fgv.br; sandra.fernandez@fgv.br.

³ Universidade de Brasília, micheletereza@unb.br.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

O setor de infraestrutura de transportes possui impactos notórios no desenvolvimento socioeconômico de um país, demandando investimentos constantes para a ampliação e manutenção das rotas viárias. No Brasil, entretanto, os investimentos públicos em infraestrutura têm apresentado queda desde 2014 (ABDIB, 2022), acarretando a deterioração dos ativos existentes. Para sanar os gargalos do setor de transportes e logística brasileiro, estima-se que seria necessário investir anualmente cerca de 2,26% do Produto Interno Bruto (PIB), contudo, em 2021, o investimento foi da ordem de apenas 0,35% do PIB (ABDIB, 2022).

Visando o desenvolvimento socioeconômico sustentável, é importante que a pauta ambiental integre as discussões sobre os investimentos no setor, de modo que as soluções de engenharia também explorem atributos de sustentabilidade. Essa pauta ganha ainda mais relevância quando se observam os impactos de investimentos em infraestrutura no meio ambiente. O relatório “*Infrastructure for climate action*” (THACKER *et al.*, 2021) aponta que 79% das emissões totais de gases de efeito estufa são provenientes de obras de infraestrutura, sendo 16% relacionadas à infraestrutura de transportes. No Brasil, o modo rodoviário respondeu por 94,3% do consumo de energia total do setor de transportes, bem como pela emissão de 189 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) equivalente em 2016 (CNT, 2022).

Posto isso, é fundamental que o setor se debruce não somente na viabilidade técnica e econômica, mas também considere aspectos de sustentabilidade, com o objetivo de mitigar impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa e o consumo energético. Sob esse prisma, as técnicas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e de Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) se destacam como ferramentas práticas e sistemáticas para análise ambiental e econômica das diferentes etapas do ciclo de vida de produtos ou serviços, contribuindo para mensurar impactos ambientais de maneira quantitativa.

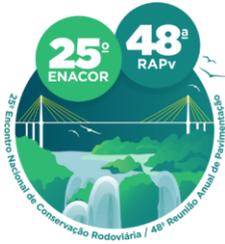
No contexto de obras rodoviárias de infraestrutura de transportes, as discussões sobre a viabilidade técnica, econômica e ambiental comumente se voltam para o pavimento, elemento de destaque no desempenho viário, seja pela segurança e conforto do usuário diante das condições de rolamento, seja pelo seu papel sobre a emissão de poluentes, o consumo de combustíveis e a eficiência energética do transporte por rodovias como um todo.

Em vista do exposto, por meio da aplicação das técnicas de ACV e ACCV, o presente trabalho tem como objetivo analisar o consumo energético, a emissão de CO₂ e os preços de venda de duas soluções de pavimento com suportes estruturais similares, sendo uma em pavimento asfáltico e outra em pavimento de concreto de cimento Portland. O método proposto pode ser replicado nos mais diferentes contextos e análises, servindo de guia para a incorporação de aspectos ambientais na tomada de decisão de investimentos em infraestrutura de transportes. Consequentemente, contribui para o desenvolvimento científico nacional, além de fomentar discussões sobre o tema.

REFERENCIAL TEÓRICO

Avaliação do Ciclo de Vida

A abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida fundamenta-se na compilação e quantificação de entradas e saídas do sistema de um produto, com a consequente análise de aspectos e de potenciais impactos ambientais ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a aquisição das matérias-primas até a disposição final, isto é, do berço ao túmulo (ABNT, 2009). Os resultados são usualmente utilizados para aferir quantitativamente impactos como acidificação, toxicidade humana, consumo energético, depleção da camada de ozônio, aquecimento global, entre outros. Conforme as pesquisas de autores como Machado (2020), Souza (2017) e Zhou *et al.* (2022), pode-se empregar a ACV para elaborar estudos comparativos entre diferentes tipos de pavimentos, como também para detectar processos e etapas do ciclo de vida com maior contribuição para os impactos ambientais.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Avaliação do Custo do Ciclo de Vida

A Avaliação do Custo do Ciclo de Vida concentra-se na estimativa dos custos associados ao ciclo de vida do produto, englobando a aquisição, fabricação e transporte de materiais, bem como a construção, manutenção e reabilitação/demolição das estruturas. A ACCV revela-se como uma técnica eficaz para avaliar alternativas de projeto que atendem a um mesmo padrão de desempenho, porém diferem em termos dos custos iniciais de implantação e dos custos oriundos de manutenções periódicas necessárias ao pavimento durante a sua vida útil. Autores como Kumari, Gupta e Deshwal (2022) e Krishna e Kumar (2020) adotaram a ACCV para conceber um quadro econômico diante de diferentes soluções de pavimentação, atrelando também aspectos ambientais como a emissão de gases de efeito estufa e de carbono equivalente.

Sistema de Custos Referenciais de Obras

Em 2017, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) instaurou o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) como referência para a orçamentação de obras e serviços de competência da autarquia. Posteriormente, a Lei nº 14.133 (BRASIL, 2021), de 1º de abril de 2021, estabeleceu as composições de custos unitários do SICRO como parâmetro para se definir o valor estimado para a licitação e contratação de obras e serviços de engenharia por todos os entes da Administração Pública direta, autárquica e fundacional da União.

O SICRO é constituído por composições de custos unitários, ferramenta que permite a definição qualitativa e quantitativa dos insumos necessários à execução de determinado serviço (DNIT, 2017a), sendo composta por seis parcelas: equipamentos, mão de obra, materiais, atividades auxiliares, tempo fixo e momento de transporte. Embora o propósito das composições de custos desse sistema seja auxiliar a orçamentação de obras públicas de infraestrutura de transportes, seus parâmetros podem ser utilizados em aplicações distintas, como a quantificação de impactos ambientais derivados dos serviços modelados pelas composições.

MÉTODO

Este trabalho se propõe a analisar duas soluções de pavimento com suportes estruturais semelhantes, uma em pavimento asfáltico e outra em pavimento de concreto de cimento Portland, por meio da quantificação do consumo energético e emissão de dióxido de carbono, bem como de seus preços de venda, desde a extração das matérias-primas até a construção e manutenção das estruturas, conforme as fases do ciclo de vida do pavimento destacadas na figura 1.

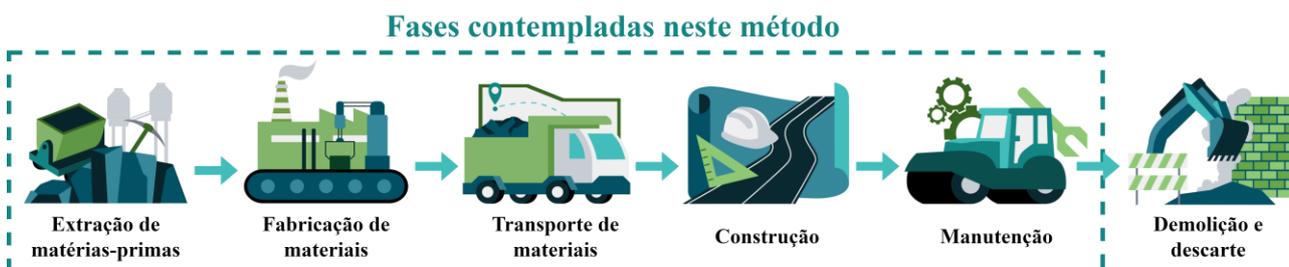
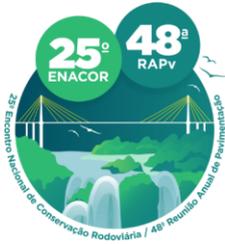


Figura 1. Fases do ciclo de vida do pavimento

Para isso, este método foi dividido em três etapas: (1) definição das estruturas dos pavimentos e soluções de manutenção, (2) cálculo do consumo energético e emissão de CO₂ e (3) cálculo dos preços de construção e manutenção dos pavimentos.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

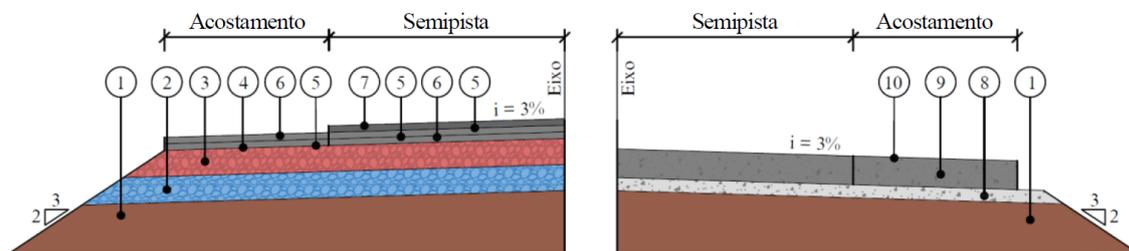
www.rapvenacor.com.br



Definição das estruturas dos pavimentos e soluções de manutenção

Para a análise proposta neste estudo, buscou-se estabelecer estruturas de pavimentos asfáltico e de concreto tecnicamente compatíveis, ou seja, que atendam a um mesmo volume de tráfego. Outro critério estabelecido foi de que as características de cada uma das estruturas retratem as principais práticas construtivas executadas em âmbito nacional, buscando representatividade da malha rodoviária brasileira na avaliação do estudo.

Nesse sentido, recorreu-se à metodologia dos Custos Médios Gerenciais (CMG) do DNIT, a qual promoveu a análise da base de projetos executados pela autarquia, de forma a definir sete principais soluções-tipo de construção de pavimento. Dentre as soluções constantes do CMG, estabeleceu-se a solução-tipo F para representar a construção de pavimento asfáltico, ao passo que o pavimento de concreto de cimento Portland foi retratado pela solução-tipo G, ambas dimensionadas para um Número N de 10^8 (DNIT, 2019). Ao lado esquerdo da figura 2, tem-se a semisseção transversal do pavimento asfáltico, dimensionado para uma vida de serviço de 10 anos, enquanto o lado direito da mesma imagem define a semisseção do pavimento de concreto, dimensionado para uma vida de serviço de 20 anos.



1. Regularização do subleito
2. Sub-base de brita graduada - espessura: 20 cm
3. Base de brita graduada tratada com cimento - espessura: 20 cm
4. Tratamento superficial simples com emulsão
5. Pintura de ligação
6. Concreto asfáltico - faixa B - espessura 5 cm
7. Concreto asfáltico - faixa C - espessura 5 cm

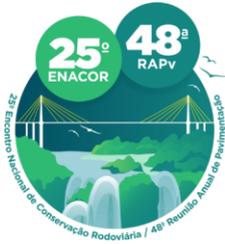
1. Regularização do subleito
8. Sub-base de concreto compactado com rolo - espessura: 10 cm
9. Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - espessura: 22 cm
10. Cura com pintura asfáltica

Figura 2. Semisseção do pavimento asfáltico e de concreto de cimento Portland, respectivamente (sem escala)

Em consulta à base de projetos do CMG, verificou-se que a classe I-B em relevo ondulado é a mais frequente. Dadas as diretrizes do Manual de Projetos Geométricos de Rodovias Rurais (DNER, 1999), tem-se a largura de 3,6 m por faixa de rolamento e de 2,5 m por acostamento.

Por fim, definidas as características dos pavimentos, avançou-se para a determinação das intervenções de restauração e conservação periódica, necessárias para a devida manutenção dessas estruturas ao longo de suas vidas de serviço. Souza (2017) aplicou modelos de previsão de desempenho para definir intervenções de restauração e conservação em estruturas de pavimento similares às utilizadas neste artigo. Assim, tais informações foram adaptadas em vista das diferentes vidas de serviço das soluções deste estudo, ou seja, 10 anos para o pavimento asfáltico e 20 anos para o pavimento de concreto.

De posse desses dados, tornou-se possível relacionar composições de custos unitários do SICRO e seus respectivos quantitativos, por quilômetro de via, às etapas de construção, restauração e conservação necessárias durante a vida de serviço dos pavimentos estudados, resultando na relação disposta na tabela 1. No contexto da ACV, a Unidade Funcional (UF) é tida como o “desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência” (ABNT, 2009). Na ACV deste estudo, portanto, definiu-se como UF o quilômetro de pavimento.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 1. Serviços e quantitativos por quilômetro de via para os pavimentos asfáltico e de concreto

Pavimento	Tipo de intervenção	Código SICRO	Descrição	Un.	Quantidade (Un./km)
Asfáltico	Construção	4011209	Regularização do subleito	m ²	13.400,00
		4011276	Base ou sub-base de brita graduada	m ³	2.620,00
		4011278	Base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento	m ³	2.500,00
		4011358	Tratamento superficial simples com emulsão	m ²	12.200,00
		4011353	Pintura de ligação	m ²	31.600,00
		4011463	Concreto asfáltico - faixa C	t	864,00
		4011459	Concreto asfáltico - faixa B	t	2.928,00
		4011212	Varredura da superfície para execução de revestimento asfáltico	m ²	43.800,00
	Restauração	4011410	Microrrevestimento a frio com emulsão modificada com polímero	m ²	4.100,00
		4011353	Pintura de ligação	m ²	4.100,00
		4011480	Fresagem descontínua de revestimento asfáltico	m ³	82,00
		4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C	t	295,20
	Conservação	4915705	Correção de defeitos por fresagem descontínua	m ³	42,70
		4915703	Correção de defeitos com mistura betuminosa	m ³	64,05
		4011353	Pintura de ligação	m ²	2.135,00
		4915631	Remendo profundo com imprimção com emulsão asfáltica	m ³	25,62
		4915632	Reparo localizado com pintura de ligação	m ³	21,35
		Concreto	Construção	4011209	Regularização do subleito
4011214	Sub-base de concreto compactado com rolo			m ³	1.315,00
4011538	Cura com pintura asfáltica			m ²	12.200,00
4011533	Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes			m ³	2.684,00
4011537	Serragem de juntas, limpeza e enchimento com selante a frio			m	3.784,44
Restauração	4915753		Reparo no interior de placa de pavimento de concreto	m ³	53,68
	4011537		Serragem de juntas, limpeza e enchimento com selante a frio	m	756,89
Conservação	4915695		Limpeza, serragem e enchimento de fissuras	m	5.185,00

Cálculo do consumo energético e emissão de CO₂

O consumo energético e a emissão de CO₂ foram calculados para cada uma das composições de custos relacionadas na tabela 1 em três etapas: (1) produção dos materiais, (2) atividade executiva dos equipamentos e (3) operações de transporte. Para a etapa de produção dos materiais, foram utilizadas as equações 1 e 2:

$$CE_{\text{pro}} = \sum EE_{\text{pro}, i} \times m_i \quad (1)$$

$$ECO_2_{\text{pro}} = \sum FCO_2_{\text{pro}, i} \times m_i \quad (2)$$

onde:

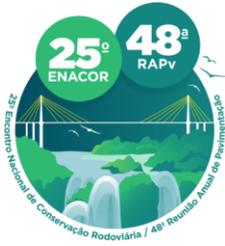
CE_{pro} representa o consumo energético do serviço na produção dos materiais [MJ/UF];

EE_{pro} representa a energia embutida na produção do material [MJ/t];

m representa a massa do material no serviço [t/UF];

ECO_{2 pro} representa a emissão de CO₂ do serviço na produção dos materiais [kgCO₂/UF];

FCO_{2 pro} representa o fator de emissão de CO₂ na produção do material [kgCO₂/t].



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



As massas dos insumos foram extraídas dos consumos atribuídos nos serviços do SICRO. Já a energia embutida e o fator de emissão de CO₂, intrínsecos a cada material, foram obtidos em referenciais bibliográficos nacionais, visando representar adequadamente a matriz energética no contexto brasileiro. Os valores utilizados e suas referências são apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Valores de referência adotados para energia embutida e fator de emissão de CO₂

Material	Un.	Energia embutida (EE)		Fator de emissão de CO ₂ (FCO ₂)	
		Valor (MJ/un)	Fonte	Valor (kgCO ₂ /un)	Fonte
Areia	t	50,00	(TAVARES, 2006, p.193)	3,99	(LOBO, 2010, p.94)
Brita	t	150,00	(TAVARES, 2006, p.193)	1,68	(ROSSI, 2013, p. 97)
Cimento	t	4.200,00	(TAVARES, 2006, p.193)	581,00	(SILVA, 2013, p. 71)
Aço	t	30.000,00	(TAVARES, 2006, p.193)	1.389,00	(SILVA, 2013, p. 63)
Cal	t	3.000,00	(TAVARES, 2006, p.193)	1.100,00	(SILVA, 2013, p. 71)
Materiais asfálticos	t	51.000,00	(TAVARES, 2006, p.193)	307,00	(SILVA, 2013, p. 71)
Polietileno de alta densidade	t	95.000,00	(TAVARES, 2006, p.194)	1.100,00	(SOUZA, 2017, p. 156)
Adesivo à base de resina epóxi	t	137.000,00	(SILVA, 2013, p. 75)	5.708,00	(SILVA, 2013, p. 75)
Óleo tipo A1	l	45,00	(SILVA, 2013, p. 47)	4,00	(SILVA, 2013, p. 47)
Diesel	l	37,00	(SILVA, 2013, p. 45)	3,28	(SILVA, 2013, p. 45)
Gasolina	l	35,00	(SILVA, 2013, p. 45)	2,66	(SILVA, 2013, p. 45)

Para a etapa de atividade executiva dos equipamentos, o consumo energético e a emissão de CO₂ podem ser obtidos por meio das equações 3 e 4:

$$CE_{exe} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{Q_{equ,i}}{P_{ser,i}} \times UO_{equ,i} \times EE_{com,i} \quad (3)$$

$$ECO_{2\ exe} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{Q_{equ,i}}{P_{ser,i}} \times UO_{equ,i} \times FCO_{2\ com,i} \quad (4)$$

onde:

CE_{exe} representa o consumo energético nas atividades executivas dos equipamentos [MJ/UF];

FC_{equ} representa o coeficiente de consumo do equipamento [l/kWh];

P_{equ} representa a potência do equipamento [kW];

Q_{equ} representa a quantidade do equipamento no serviço;

P_{ser} representa a produção de equipe do serviço [UF/h];

UO_{equ} representa a utilização operativa do equipamento no serviço;

EE_{com} representa a energia embutida do combustível [MJ/l];

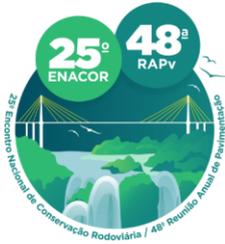
ECO_{2 exe} representa a emissão de CO₂ nas atividades executivas dos equipamentos [kgCO₂/UF];

FCO_{2 com} representa o fator de emissão de CO₂ do combustível [kgCO₂/l].

O consumo energético e as emissões oriundos das operações de transporte necessárias para o deslocamento dos materiais são calculados por meio das equações 5 e 6.

$$CE_{tra} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{2 \times DMT_{equ,i}}{V_{equ,i}} \times \frac{m_{tra,i}}{Cap_{equ,i}} \times EE_{com,i} \quad (5)$$

$$ECO_{2\ tra} = \sum FC_{equ,i} \times P_{equ,i} \times \frac{2 \times DMT_{equ,i}}{V_{equ,i}} \times \frac{m_{tra,i}}{Cap_{equ,i}} \times FCO_{2\ com,i} \quad (6)$$



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



onde:

CE_{tra} representa o consumo energético do serviço nas operações de transporte [MJ/UF];

DMT_{equ} representa a distância média de transporte [km];

v_{equ} representa a velocidade média do equipamento no transporte [km/h];

m_{tra} representa a massa de transporte do item no serviço [t/UF];

Cap_{equ} capacidade de carga do equipamento por viagem [t];

$ECO_{2 tra}$ representa a emissão de CO_2 do serviço nas operações de transporte [kg CO_2 /UF].

Os dados referentes ao coeficiente de consumo “ FC_{equ} ”, à potência “ P_{equ} ” e à capacidade “ Cap_{equ} ” foram obtidos no Caderno Técnico de Parâmetros de Equipamentos (DNIT, 2023). Para as velocidades médias “ v_{equ} ” dos equipamentos no transporte, foram adotados os valores referenciais da metodologia do SICRO para leito natural (40 km/h) e rodovia pavimentada (60 km/h) (DNIT, 2017a). Por fim, as distâncias médias “ DMT_{equ} ” foram atribuídas em conformidade com as premissas estabelecidas na metodologia do CMG, conforme a tabela 3 resume.

Tabela 3. Distância médias e velocidades adotadas no estudo (adaptado de DNIT, 2019)

Tipo de intervenção	Item	Distância (km)	Velocidade (km/h)
Todas	Emulsões	230	60
	Cimento asfáltico de petróleo (CAP)	300	60
	Demais materiais	50	60
Construção	Atividades auxiliares	9	40
Restauração	Atividade auxiliar e materiais demolidos	27	60
Conservação	Atividade auxiliar e materiais demolidos	25	60

Por fim, o consumo energético e a emissão de CO_2 totais consistem na soma das parcelas de produção dos materiais, atividade executiva dos equipamentos e operações de transporte, conforme equações 7 e 8.

$$CE_{tot} = CE_{pro} + CE_{exe} + CE_{tra} \quad (7)$$

$$ECO_{2 tot} = ECO_{2 pro} + ECO_{2 exe} + ECO_{2 tra} \quad (8)$$

onde:

CE_{tot} representa o consumo energético total do serviço [MJ/UF];

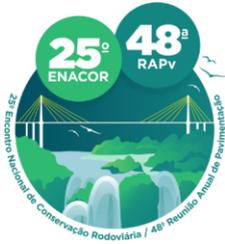
$ECO_{2 tot}$ representa a emissão de CO_2 total do serviço [kg CO_2 /UF].

Cálculo dos preços de construção e manutenção dos pavimentos

De posse dos serviços e dos respectivos quantitativos por quilômetro de via (tabela 1), tornou-se possível equacioná-los com os custos referenciais das composições do SICRO, disponíveis no sítio eletrônico do DNIT. Como base, adotou-se a média de custo dos Estados que compõem a região Sudeste para o mês de janeiro de 2023.

No caso dos materiais asfálticos, a Portaria nº 1.977 (DNIT, 2017b), de 25 de outubro de 2017, estabelece o uso dos preços informados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para o valor de aquisição, ao passo que os gastos provenientes do transporte desses insumos devem ser obtidos por meio das equações tarifárias dispostas na mesma portaria. As operações de momento de transporte, referentes aos materiais e atividades auxiliares previstos nas estruturas analíticas das composições de custos do SICRO, foram calculadas conforme distâncias definidas na tabela 3.

O preço de venda por quilômetro de via dos pavimentos consistiu no custo dos serviços acrescidos da parcela de Benefícios e Despesas Indiretas (BDI). A Instrução Normativa nº 62, de 17 de setembro de 2021 (DNIT, 2021), regulamenta a aplicação das taxas referenciais de BDI e suas atualizações,



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



divulgadas no sítio eletrônico do DNIT, de acordo com os tipos de intervenção de infraestrutura. Portanto, conforme as taxas referenciais vigentes em janeiro de 2023 pelo Ofício-Circular nº 4499/2022 (DNIT, 2022), adotou-se a taxa de BDI sobre o custo direto de 25,01% para a construção e restauração da via e de 32,07% para a conservação do pavimento.

Ainda, a Instrução Normativa nº 62, de 17 de setembro de 2021 (DNIT, 2021), estabelece a adoção obrigatória de BDI diferenciado para os preços de referência de aquisição e transporte dos materiais betuminosos. Logo, para esses casos, adotou-se a taxa diferenciada de 15%.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do método e das condições de contorno descritos, foram obtidos os consumos energéticos e as emissões de CO₂ (1) na produção dos materiais, (2) nas atividades executivas dos equipamentos e (3) nas operações de transporte. A soma dessas três parcelas resultou nos consumos energéticos e emissões de CO₂ totais. Além disso, calcularam-se os preços relacionados tanto à construção dos pavimentos asfáltico e de concreto quanto à manutenção ao longo de suas vidas de serviço. Esses valores são apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Valores de consumo energético, emissão de CO₂ e preço

Pavimento	Fase	CE _{pro} (GJ/km)	CE _{exe} (GJ/km)	CE _{tra} (GJ/km)	CE _{tot} (GJ/km)	ECO _{2pro} (tCO ₂ /km)	ECO _{2exe} (tCO ₂ /km)	ECO _{2tra} (tCO ₂ /km)	ECO _{2tot} (tCO ₂ /km)	Preço (R\$/km)
Asfáltico	Construção	16.693,28	723,62	2.104,99	19.521,88	459,85	64,15	186,60	710,60	4.043.949,93
	Manutenção	2.564,64	96,10	131,74	2.792,48	50,63	8,43	11,68	70,73	517.002,12
	Total	19.257,92	819,72	2.236,73	22.314,36	510,47	72,57	198,28	781,33	4.560.952,05
Concreto	Construção	6.882,23	505,89	1.043,20	8.431,32	675,18	44,70	92,48	812,37	2.333.593,14
	Manutenção	228,78	58,24	13,84	300,87	14,63	4,76	1,23	20,62	153.071,62
	Total	7.111,01	564,13	1.057,04	8.732,18	689,81	49,47	93,71	832,99	2.486.664,76

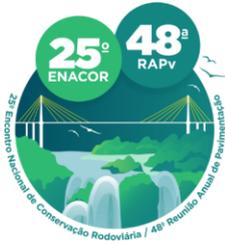
O consumo energético, a emissão de CO₂ e o preço foram divididos pela vida de serviço, em ano, considerada no dimensionamento de cada pavimento, conforme valores dispostos na tabela 5. Tal transformação teve como intuito possibilitar a análise das estruturas numa mesma escala temporal.

Tabela 5. Valores absolutos e por ano do consumo energético, emissão de CO₂ e preço

Pavimento	CE _{tot} (GJ/km)	ECO _{2tot} (tCO ₂ /km)	Preço (R\$/km)	Vida de serviço (ano)	CE _{tot} (GJ/km/ano)	ECO _{2tot} (tCO ₂ /km/ano)	Preço (R\$/km/ano)
Asfáltico	22.314,36	781,33	4.560.952,05	10	2.231,44	78,13	404.394,99
Concreto	8.732,18	832,99	2.486.664,76	20	436,61	41,65	51.700,21

Observa-se que o pavimento asfáltico consome aproximadamente 156% mais energia que a solução de concreto em valores absolutos, correspondendo a um consumo energético por ano 400% superior. Tais resultados convergem com as análises de Zhou *et al.* (2022), Machado (2020) e Souza (2017), os quais concluíram que, para uma mesma vida de serviço, a quantidade de energia consumida nos pavimentos asfálticos estudados é inferior à dos pavimentos de concreto.

Já para a massa total de dióxido de carbono, em valores absolutos, a emissão da estrutura de concreto é 7% maior do que para a asfáltica. Contudo, a maior vida de serviço desempenhada pela solução de concreto faz com que suas emissões de CO₂ por ano sejam 47% menores do que as da solução asfáltica. Tais resultados diferem das pesquisas de Machado (2020) e Souza (2017), nas quais, para um mesmo período de serviço, o pavimento de concreto exibiu emissão de CO₂ superior à do asfáltico. Em ambos os estudos, as espessuras das camadas dimensionadas pelos autores foram



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



inferiores para o pavimento asfáltico semirrígido e superiores para o de concreto. Assim, credita-se parte da divergência dos resultados às diferentes quantidades de material empregadas nas soluções. Outro ponto relevante de se destacar diz respeito aos fatores de emissão de dióxido de carbono dos materiais. No caso, Machado (2020) e Souza (2017) atribuíram para o cimento Portland um fator de emissão quase 40% superior ao estipulado neste estudo, o que se configura como outra fonte de disparidade entre as emissões de CO₂ obtidas no presente trabalho e pelos autores citados.

Os gráficos das figuras 3 e 4 permitem a avaliação mais detalhada do consumo energético e da emissão de CO₂ por ano. Tratando da fase do ciclo de vida (parte esquerda das figuras), é evidente que a construção se configura como a mais representativa para ambos os parâmetros e pavimentos analisados. A etapa de manutenção do pavimento de concreto representa apenas 3% do consumo energético e 2% das emissões de CO₂, ao passo que, no asfáltico, a manutenção é responsável por somente 13% do consumo energético e 9% das emissões de dióxido de carbono.

No que tange às etapas de cálculo (parte direita das figuras), para ambas as estruturas, a produção dos materiais se demonstra como a mais significativa na ACV, refletindo mais de 86% e 81% da energia consumida para os pavimentos asfáltico e de concreto, respectivamente. A presente etapa também foi responsável por 65% das emissões de CO₂ no pavimento asfáltico, assim como por 83% das emissões do composto químico no pavimento de concreto. Esses resultados vão ao encontro das pesquisas de Machado (2020) e Zhou *et al.* (2022), que também indicaram a produção dos materiais como a maior responsável pelo consumo de energia e emissão de gases na construção de pavimentos.

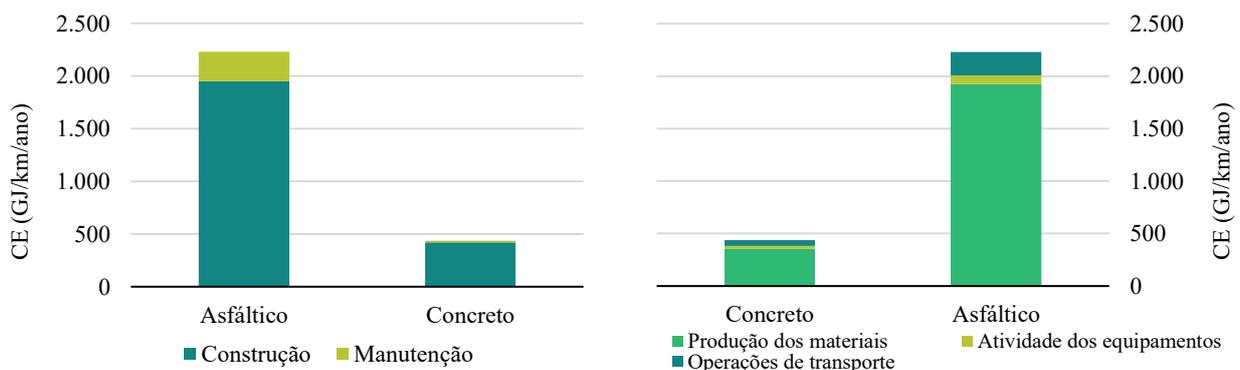


Figura 3. Consumo energético por ano por fase de ciclo de vida e por etapa de cálculo, respectivamente

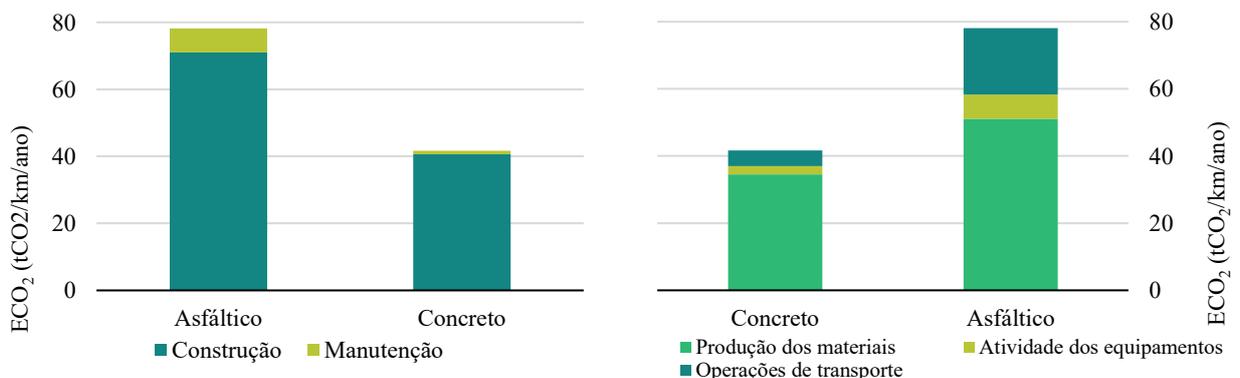
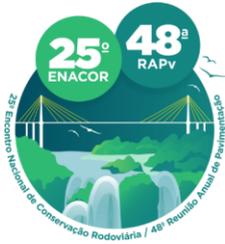


Figura 4. Emissão de CO₂ por ano por fase de ciclo de vida e por etapa de cálculo, respectivamente

Aprofundando a análise sobre a etapa que mais impacta o consumo energético e as emissões de CO₂, isto é, a produção dos materiais, são apresentados os gráficos da figura 5 (consumo energético) e da figura 6 (emissão de CO₂). No caso do consumo energético, o cimento é o material de contribuição mais



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



expressiva no pavimento de concreto, ao passo os materiais asfálticos são os mais representativos no pavimento asfáltico.

Já para a emissão de CO₂, novamente o cimento é o material de maior relevância para a solução de concreto, contribuindo para mais de 92% da emissão total. Apesar do consumo de cal por quilômetro de pavimento ser 30% inferior ao de material asfáltico, a maior representatividade da cal no pavimento asfáltico decorre do seu elevado fator de emissão, quase 4 vezes o valor atribuído aos materiais asfálticos e 2 vezes ao cimento. Por fim, a categoria intitulada como “outros” compila as contribuições do adesivo à base de resina epóxi, polietileno de alta densidade e óleo tipo A1.

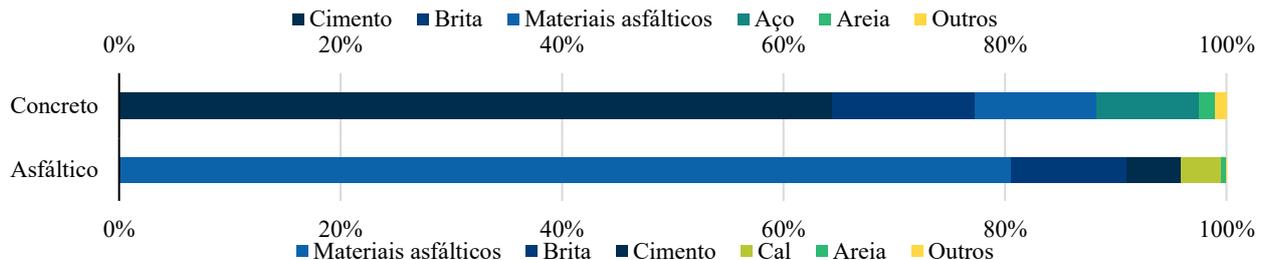


Figura 5. Consumo energético por insumo na etapa de produção dos materiais

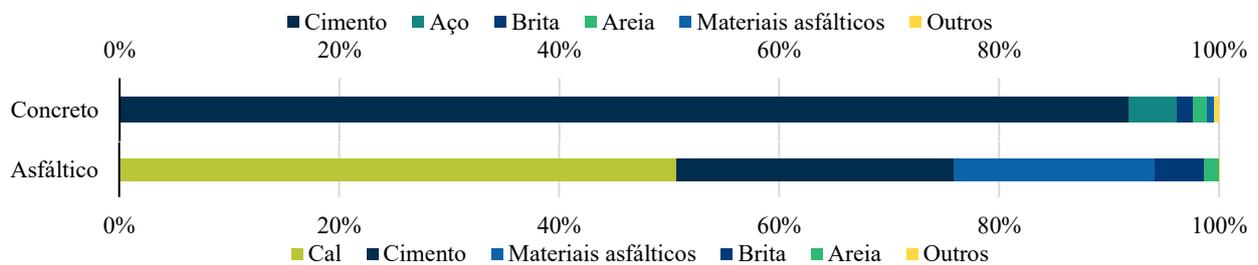
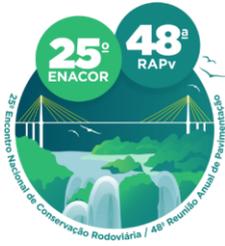


Figura 6. Emissão de CO₂ por insumo na etapa de produção dos materiais

Em relação aos preços de construção e manutenção, o pavimento de concreto apresenta preço total absoluto 45% inferior ao do pavimento asfáltico, mesmo sem a ponderação pela vida de serviço. Ao serem comparados os preços por ano, essa diferença aumenta para 73%, já que o pavimento de concreto investigado possui vida de serviço maior.

Logo, em que pesem as diferentes vidas de serviço atribuídas aos pavimentos neste artigo, a estrutura asfáltica exibiu preços absolutos e anuais superiores em comparação com a de concreto. Esses achados estão em consonância com estudos anteriores realizados por Kumari, Gupta e Deshwal (2022), Machado (2020) e Souza (2017), que consideram vidas de serviço idênticas para os tipos de pavimento. Todavia, essas pesquisas concluíram que o pavimento de concreto possui maiores custos iniciais de construção, o que não é o caso para o presente trabalho. Os dados apresentados neste estudo, assim como as discussões de Cavalet *et al.* (2019), sugerem que o pavimento de concreto é menos oneroso em ambas as fases do ciclo de vida em foco (*i.e.*, construção e manutenção). Nesse sentido, Beltrão *et al.* (2022) sugerem que o maior preço de construção de pavimentos asfálticos em relação aos de concreto tem vínculo com a elevação no preço do cimento asfáltico, que subiu mais de 147% de janeiro de 2017 a outubro de 2021. Por fim, é importante discutir alguns aspectos relacionados ao método proposto no presente estudo. Dentre as atividades envolvidas, a obtenção das quantidades totais de materiais e equipamentos foi a que consumiu mais tempo e recursos, uma vez que foi necessário acessar cada uma das composições de custos auxiliares e relacioná-las com o serviço principal quantificado. Essa atividade requer certo conhecimento e familiaridade com o SICRO, a fim de garantir que as associações sejam feitas de maneira correta.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Outro ponto de dificuldade enfrentado na realização do estudo foi a definição da energia embutida e do fator de emissão de CO₂ dos materiais, em razão da escassez de referências oficiais que representem adequadamente a realidade brasileira. A adoção de dados internacionais deve ser vista com cautela, pois esses parâmetros sofrem influência das cadeias produtivas e matrizes energéticas, que podem ser substancialmente diferentes entre países. Em virtude de sua forte influência nas análises, a determinação desses parâmetros requer atenção especial, sob o risco de inconsistências nas análises.

A respeito do escopo da análise, cabe salientar que o presente trabalho se ateve somente aos serviços relacionados à pavimentação, não contemplando demais atividades necessárias à construção de rodovias, como terraplenagem e administração local. Tampouco foram consideradas as contribuições relativas à fabricação dos equipamentos empregados nos serviços, dada a inexistência de parâmetros práticos para a obtenção de suas energias embutidas e fatores de emissão de CO₂.

No que tange ao ciclo de vida (figura 1), este estudo não abrangeu os impactos da fase de demolição e descarte dos pavimentos. Não obstante, entende-se que as atividades envolvidas nessa fase tendem a não alterar significativamente os resultados, dada a elevada contribuição da produção dos materiais no consumo energético e na emissão de CO₂, bem como da fase de construção no preço dos pavimentos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os procedimentos e formulações elucidados no método desta pesquisa viabilizam a ACV por meio da quantificação do consumo energético e da emissão de CO₂ de obras rodoviárias a partir de parâmetros oficiais do SICRO, promovendo o progresso do conhecimento científico nacional e estimulando discussões sobre o tema. O sucesso de sua aplicação para avaliar duas soluções tecnicamente compatíveis de pavimento atesta sua validade e reforça sua utilidade.

Embora o método tenha sido utilizado para avaliar o desempenho de pavimentos, ele pode ser facilmente reproduzido nos mais variados serviços do SICRO. Além disso, suas equações podem ser adaptadas aos contextos de diferentes sistemas referenciais balizados por composições de custos. Portanto, acredita-se que o método proposto contribui para que aspectos de sustentabilidade sejam incorporados a análises de viabilidade técnica, econômica e ambiental de investimentos em infraestrutura de transportes no geral.

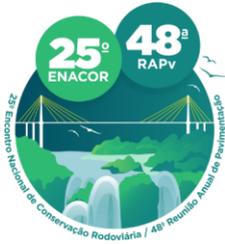
A análise entre os pavimentos dimensionados para um mesmo volume de tráfego revelou que, relativizando-se os resultados pela vida de serviço de cada estrutura, as emissões de CO₂, o consumo energético e o preço da solução asfáltica são superiores aos valores da solução de concreto em 47%, 400% e 73%, respectivamente. Assim, considerando somente as métricas avaliadas nesta pesquisa, o pavimento de concreto de cimento Portland se mostrou mais viável em termos econômicos e ambientais.

No entanto, é primordial ressaltar que esses resultados são válidos apenas dentro das condições de contorno delineadas neste trabalho, logo, não devem ser generalizados para cenários distintos, nem utilizados para afirmações taxativas. Isso porque há inúmeros outros aspectos que devem ser observados no decorrer de análises de viabilidade técnica, econômica e ambiental, inclusive, as próprias soluções de pavimento podem ser diferentes a depender dos parâmetros de dimensionamento adotados.

Finalmente, estudos voltados a consolidar uma base de dados nacional sólida e atual da energia embutida e do fator de emissão de CO₂ são fundamentais para a uniformização, confiabilidade e praticidade das análises, servindo para impulsionar a inclusão da pauta da sustentabilidade na tomada de decisão de investimentos em infraestrutura de transportes. Ademais, pesquisas podem avançar para a quantificação de dados afetos ao uso da rodovia, como consumo de combustível e emissão de poluentes, além de fases do ciclo de vida e parcelas de cálculo não abordadas no presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INFRAESTRUTURA E DE INDÚSTRIAS DE BASE (ABDIB). **Livro Azul da Infraestrutura**: Uma radiografia dos projetos de infraestrutura no Brasil. Edição 2022. 2022.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 14040**. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BELTRÃO, L. M. P. *et al.* Análise comparativa dos custos de construção de pavimentos flexíveis, semirrígidos e rígidos. 24º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR): 47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV), ago. 2022, Bento Gonçalves. **Anais do congresso**. Bento Gonçalves: ABDER e ABPv, 2022. p. 321-337.

BRASIL. Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. **Diário Oficial da União**: seção 1 - Extra F, Brasília, DF, n. 61-F, p. 2, 1º abr. 2021.

CAVALET, V. N. *et al.* Análise comparativa do custo-benefício entre pavimentos flexíveis em concreto asfáltico e pavimentos rígidos em concreto de cimento Portland aplicado em rodovia de alto tráfego. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, nov. 2019, Balneário Camboriú. **Anais do congresso**. Balneário Camboriú: ANPET, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias 2022**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Caderno Técnico de Parâmetros de Equipamentos**. Mês de referência: janeiro de 2023. Versão 1.0. 2023.

_____. **Ofício-Circular nº 4499/2022**. Brasília, DF: DNIT, 16 de agosto de 2022.

_____. Instrução Normativa nº 62/DNIT SEDE, de 17 de setembro de 2021. Regula critérios para utilização dos custos referenciais dispostos nos sistemas de custos referenciais do DNIT nos casos especiais que disciplina. **Boletim Administrativo**. Edição nº 178. Brasília, DF: DNIT, 20 de setembro de 2021.

_____. **Manual de Custos Médios Gerenciais - Volume 01: Manual de Metodologia**. 1ª edição. Brasília, 2019.

_____. **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes - Volume 01: Metodologia e Conceitos**. 1ª edição. Brasília, 2017a.

_____. Portaria nº 1.977, 25 de outubro de 2017. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 206, p. 174, 26 out. 2017b.

KRISHNA, U. S. R., KUMAR, C. N. S. A case study on maintenance of bituminous concrete pavement considering life cycle cost analysis and carbon footprint estimation. **International Journal of Construction Management**, v. 22, n. 9, p. 1756-1764, mai. 2020.

KUMARI, M., GUPTA, P., DESHWAL, S. S. Integrated Life Cycle Cost Comparison and Environment Impact Analysis of the Concrete and Asphalt Roads. **Materials Today: Proceedings**, v. 60, pt. 1, p. 345-350, fev. 2022.

LOBO, F. H. R. **Inventário de emissão equivalente de dióxido de carbono e energia embutida na composição de serviços em obras públicas: estudo de caso no estado do Paraná**. 2010. Dissertação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MACHADO, C. N. **Análise do Ciclo de Vida (ACV) de Pavimento Asfáltico e Rígido na BR-163/364/MT**. 2020. Dissertação, Universidade La Salle, Canoas, 2020.

SILVA, B. V. **Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações**. 2013. Dissertação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SOUZA, L. de P. **Uso integrado das ferramentas de análise do ciclo de vida e de análise do custo do ciclo de vida em pavimentação**. 2017. Dissertação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

THACKER, S. *et al.* **Infrastructure for climate action**. Denmark, Copenhagen: UNOPS, 2021.

ROSSI, E. **Avaliação do ciclo de vida da brita para a construção civil: estudo de caso**. 2013. Dissertação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

ZHOU, X. *et al.* Life cycle assessment of asphalt and cement pavements: Comparative cases in Shanxi Province. **Construction and Building Materials**, v. 315, n. 125738, jan. 2022.