

Setembro 2023

Nº 02

REVISTA
ENINFRA



© Copyright 2023, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Escola Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Os conceitos e opiniões expressas em obras doutrinárias assinadas são de inteira responsabilidade dos autores.

A reprodução completa ou parcial desta publicação é permitida, sem alterar seu conteúdo, desde que citada a fonte e sem fins comerciais.



Escola Nacional de Infraestrutura de Transportes/Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

Setor de Autarquias Norte, Quadra 03 Lote A,
Ed. Núcleo dos Transportes, Brasília – DF
CEP: 70040-902
Tel/fax: (61) 3315-4831

<https://revistaeninfra.dnit.gov.br/>

CONSELHO EDITORIAL

Editor-chefe: Dr. Galileu Silva Santos (DNIT)

Subeditor: M.Sc. Andre de Oliveira Nunes (DNIT)

Subeditora: Dr.^a Carolina de Lima Neves Seefelder (DNIT)

Subeditor: M.Sc. Luiz Heleno Albuquerque Filho (DNIT)

Subeditor: Dr. Mario Sergio de Souza Almeida (DNIT)

Subeditor: M.Sc. Mauro Medeiros de C. Junior (DNIT)

Subeditor: Dr. Rodilon Teixeira (DNIT)

EQUIPE TÉCNICA

Projeto gráfico, capa e diagramação

(CGIPT/DPP - DNIT)

Ana Luísa Ferreira Lacerda

Revisão de texto (CGIPT/DPP - DNIT)

Antônia Simone da Silva

Gabriel Aranibar Salazar

Geraldo Teodoro de Oliveira Junior

Thália Raelly de Lima Romeiro Mattos

Yohanna Nunes Soares Tsuzuki

Assessoria editorial (CGIPT/DPP - DNIT)

Vanessa Ribeiro Peixoto da Matta

**Revisão de texto e de idiomas
(CGIPT/DPP - DNIT)**

Vanessa de Oliveira Pereira

Revisão de texto e de idiomas

Ayla Christina Alves dos Santos

Revista ENINFRA/Escola Nacional de Infraestrutura de Transportes

– Vol. 1, n. 2 (2023) – Brasília: ENINFRA, 2023 – Anual.

1. Infraestrutura de Transportes Multidisciplinar - Brasil, I. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

**4 APRESENTAÇÃO****5 ORIENTAÇÕES PARA AUTORES DE ARTIGOS****ARTIGOS CIENTÍFICOS****6 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO FILME DE LIGANTE NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM BORRACHA DO TIPO RAR**

Letícia Nunes Lopes - Márcio Muniz de Farias - Luiz Guilherme Rodrigues de Mello

25 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL: PREVISÃO DO COMPORTAMENTO FUNCIONAL DE PAVIMENTOS NO MÉTODO MeDiNa

Lucas Dotto Bueno - Deividi da Silva Pereira - Luciano Pivoto Specht - Henrique Otto Coelho
Jose Antonio Santana Echeverria

39 ESTUDO PRELIMINAR PARA DOSAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO UTILIZANDO MATERIAIS FRESADOS DE DIFERENTES ORIGENS E IDADES

Jamille Freitas Fiuza - Mario Sergio de Souza Almeida - Weiner Gustavo Silva Costa
Elane Donato Santos - Paulo Ricardo Lemos de Santana

53 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA E O POTENCIAL USO NO BRASIL

Bruno Vendramini dos Santos - Carlos Antônio Gomes Coelho - João Henrique Silva Rêgo

74 ANÁLISE DAS METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO E EFICIÊNCIA HIDRÁULICA DE DESCIDAS D'ÁGUA EM DEGRAUS

Letícia Karine Sanches Brito - Renan Ribeiro Guzzo - Meiry Elizabeth dos Santos
Simoneli Fernandes Mendonça - Alex de Sousa Bento

90 MODELO DE DETERIORAÇÃO DE ESTRUTURAS BASEADO EM CADEIAS DE MARKOV APLICADO AO BANCO DE DADOS DO DNIT

Paulo Fernando Matos de Santana - Breno Hvala de Figueiredo - Rafael Salles Pereira
Jorge Martins Sarkis - Cintia Adriana Azevedo de Liz Anhaia

102 ANÁLISE COMPARATIVA, EM RELAÇÃO ÀS EMISSÕES DE CO₂, ENTRE O MODO DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO E HIDROVIÁRIO. ESTUDO DE CASO NA BR-356 E HIDROVIA DO PARAÍBA DO SUL

Mauro Medeiros de Carvalho Junior - Thais de Moura Lima - Marcelo Gomes Miguez

115 GESTÃO FINANCEIRA DE RISCOS EM DESLIZAMENTOS DE ENCOSTAS: ESTIMATIVA DE PROVISÕES ANUAIS BASEADA EM DADOS DO DNIT

Bernardo Cascão Pires e Albuquerque - Darym Junior Ferrari de Campos - Bruna Cardoso Mendes

127 ANÁLISE DA VIABILIDADE OPERACIONAL DE ESCAVADEIRAS HIDRÁULICAS PARA DRAGAGEM MECÂNICA DA HIDROVIA DO RIO TAQUARI

Augusto Ayub - Ariela da Silva Torres - Paula Martins Machado

ARTIGOS TÉCNICOS

- 138** IMPLEMENTAÇÃO DE FORMULÁRIOS PADRÃO – PASSO INICIAL PARA A FORMAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS DE OBRAS E PROJETOS NO DNIT
Nelson Wargha Filho - Emmanuelle Stefânia Holdefer Garcia - Amanda Menezes Ricardo
Henrique Petisco de Souza - Alex Duarte de Oliveira
- 154** EFEITO DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS NA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO A PARTIR DE ANÁLISES MECANÍSTICAS
Raul Tadeu Lobato Ferreira - Márcio Muniz de Farias - Lucas Fermi Pereira de Oliveira
Hermes Wiliam Bressanin - Luiz Guilherme Rodrigues de Mello
- 174** ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA APLICADA À REVISÃO DOS PROJETOS-TIPO DE GALERIAS CELULARES PRÉ-MOLDADAS (ADUELAS)
Mariane Sisdelli de Oliveira - Alírio Brasil Gimenez - Pedro Jorge Chama Neto
Carolina Yumi Ito da Silva - Bruna Brunetta Toscano
- 187** UM PANORAMA DA CRIAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA NACIONAL DE RECUPERAÇÃO, OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO E GERENCIAMENTO DE ECLUSAS (PROECLUSAS) NO BRASIL
Iviane Cunha Santos - Gleilson Mendes Nunes - Augusto Ayub - David Wilkerson Bessa da Luz
- 209** ALUGUEL SOCIAL NO ÂMBITO DO PROGRAMA CONCILIA BR-381 E ANEL – PRINCIPAIS APRENDIZADOS E SUGESTÕES PARA PROGRAMAS FUTUROS
Laura Maria Alves Vaz Martins - Michele Mitie Arake Fragoso - Tiago Cardoso Ferreira
Glícia Oliveira Soares - Diarlton Cesar Torres
- 222** VAMOS FALAR SOBRE ÉTICA PÚBLICA? PROJETO-PILOTO DESENVOLVIDO PELA COMISSÃO DE ÉTICA SETORIAL DO DNIT
Rodilon Teixeira - Meire Cristina Cabral de Araújo Silva - Clarissa de Sousa Miranda





APRESENTAÇÃO

A Revista ENINFRA é o periódico técnico-científico do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), que visa divulgar pesquisas, experiências e iniciativas institucionais voltadas à infraestrutura de transportes, de forma interdisciplinar.

A Revista é destinada a toda a comunidade da área:

servidores públicos, prestadores de serviço, consultores, profissionais autônomos, pesquisadores, docentes, estudantes e demais interessados.

Esta **2ª Edição** marca o início de uma nova fase para a Revista, marcada por alguns avanços importantes:

- A Revista ENINFRA migrou para o *Open Journal Systems (OJS)*, plataforma para a submissão e divulgação de trabalhos utilizada por periódicos nacionais e internacionais. Essa medida teve por objetivo facilitar os processos de gestão de submissões, avaliação e indexação, bem como aumentar a transparência das atividades editoriais;
- Alinhando-se aos padrões internacionais de divulgação de pesquisa científica, a revista passou a adotar o processo de revisão por pares do tipo duplo-cego (*double blind peer review*). Nesse processo, dois ou mais especialistas foram convidados a opinar, de maneira anônima, sobre cada trabalho, visando contribuir para a sua qualidade. Para garantir um tratamento isonômico e impessoal, a identidade dos autores de cada manuscrito também foi mantida em sigilo ao longo do processo;
- Outra novidade é a categorização dos trabalhos em duas seções distintas na Revista: artigo científico e artigo técnico. A seção de artigos científicos se dedica rigorosamente a disseminar novas pesquisas desenvolvidas à luz do método científico. Já a seção de artigos técnicos, também de cunho científico, visa divulgar à sociedade as experiências e boas práticas nos assuntos relativos às atribuições institucionais do DNIT, além de difundir a reflexão sobre os desafios que envolvem a atuação da autarquia.

Nesta edição, os principais temas abordados são: planejamento, transporte aquaviário, pavimentação, drenagem rodoviária, estruturas, meio ambiente e administração pública.

Na oportunidade, a Equipe Editorial agradece aos revisores convidados, que dedicaram seu tempo e especialização para avaliar os artigos submetidos e fornecer *feedbacks* construtivos aos autores. Seu trabalho cuidadoso e seu engajamento são fundamentais para que a Revista ENINFRA possa continuar oferecendo conteúdo de qualidade e relevância aos leitores e toda a comunidade acadêmica e profissional da área de infraestrutura de transportes.

Que todos tenham uma boa leitura!

Equipe Editorial da Revista ENINFRA





ORIENTAÇÕES PARA AUTORES DE ARTIGOS

A revista ENINFRA utiliza a plataforma *Open Journal Systems (OJS)*, um *software* de gerenciamento e publicação de periódicos eletrônicos instalado em um servidor *Web*. A maior parte do fluxo editorial no OJS é automatizado, proporcionando maior eficiência ao processo de publicação, ao mesmo tempo em que são registradas as atividades realizadas pelos diversos atores envolvidos. Todos os trabalhos submetidos passam por um procedimento de revisão duplo cego (*double blind peer review*).

Os autores de artigos podem acompanhar as fases em que se encontram seus trabalhos no fluxo editorial desde a submissão. Para isso, devem se cadastrar no OJS.

SUBMISSÃO DO ARTIGO

Para submeter ou acompanhar os artigos, os autores devem fazer *login* no *site* da Revista, usando os dados fornecidos durante o cadastro. Ao clicar no botão “Nova Submissão”, o processo de envio do artigo é iniciado. O autor deve aceitar os requisitos para envio do manuscrito, os termos da Declaração de Direito Autoral e as condições de coleta e armazenamento de dados da Política de Privacidade à Revista ENINFRA. Em seguida, o autor deve transferir o artigo no formato requerido (Word), inserir os metadados do seu trabalho (título, dados dos autores, palavras-chave, resumo) e confirmar o envio. O artigo deve seguir a formatação indicada no *template* disponível no site da revista.

EDITAIS DE CHAMADAS

Apesar de adotar um fluxo contínuo de submissão, avaliação e editoração, a Revista ENINFRA realiza regularmente chamadas para submissão de artigos. Os trabalhos aprovados que não puderem ser publicados na edição da chamada, visto que há um limite de publicações, são considerados para publicação em edição posterior.



INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO FILME DE LIGANTE NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM BORRACHA DO TIPO RAR

INFLUENCE OF THE FILM THICKNESS ON THE DOSAGE OF ASPHALT MIXTURES USING RAR

Letícia Nunes Lopes - leticiacnunes@gmail.com - <https://orcid.org/0009-0006-9151-936X>

Márcio Muniz de Farias - mmuniz94@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-5257-911X>

Luiz Guilherme Rodrigues de Mello - luiz.mello@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0000-0002-1507-0154>

RESUMO: O uso de borracha moída de pneu (BMP) em misturas asfálticas por via úmida (do tipo *field blend*) é praticado há anos nos Estados Unidos, com histórico de bom desempenho. No entanto, tem como desvantagens a necessidade de equipamento apropriado ao processo de fabricação instalado na usina, altas temperaturas de agitação do ligante modificado e maior tempo de preparo. No Brasil é mais comum a produção de mistura asfalto-borracha (AB) a partir do ligante modificado na distribuidora (do tipo *terminal blend*), consumindo uma menor quantidade de borracha e adicionando óleos extensores durante sua produção. A *Reacted and Activated Rubber* (RAR), composta por asfalto convencional, granulado fino de borracha e fíler, foi desenvolvida com a proposta de simplificação do processo de usinagem, proporcionando a utilização de uma maior porcentagem de BMP e um processo de mistura a temperaturas mais baixas. A RAR atua como um fíler seco e muito áspero, portanto torna-se extremamente importante determinar sua superfície específica e espessura do filme de ligante *TF* para a dosagem da mistura. Segundo Nanjegowda *et al.* (2019), devido a sua composição, a RAR pode ser considerada interagindo como agregado ou como ligante, dentro da mistura asfáltica, e tais considerações resultarão em diferentes *TFs*. Este estudo buscou avaliar a *TF* na etapa de dosagem de misturas asfálticas do tipo *gap-graded* com e sem a adição de RAR, a partir da metodologia desenvolvida pelos autores. Os resultados apresentam valores de *TF* na faixa recomendada pelos referidos autores para a prevenção ao surgimento de trincas e desagregação da mistura.

PALAVRAS-CHAVE: asfalto-borracha; dosagem de misturas asfálticas; espessura do filme de ligante.

ABSTRACT: The use crumb rubber in field blend processs has been practiced for years in the United States, with a history of good performance. However, it has disadvantages such as the need for appropriate equipment for the manufacturing process installed in the plant, high temperatures and longer time to reaction. In Brazil, it is more common to produce asphalt-rubber mixtures using terminal blended modified asphalt-rubber, which consumes a smaller amount of rubber and adds extender oils during its production. The Reacted and Activated Rubber (RAR), composed of conventional asphalt, fine crumb rubber and filler, was developed with the aim of simplifying the hot mixing process, allowing the use of a higher percentage of rubber and lower mixing temperatures. RAR acts as a dry and very rough filler, therefore determining its specific surface and the binder film thickness *TF*) to properly dose the asphalt mixture. According to Nanjegowda *et al.* (2020), due to its composition, RAR can be considered

interacting as an aggregate or as a binder, within the asphalt mixture and such considerations will result in different TFs. Thus, this study aims to evaluate the TF in the gap-graded asphalt mixtures designed with and without the addition of RAR, based on the methodology developed by the authors. The results show TF values in the range recommended by the aforementioned authors for preventing the appearance of cracks and ravelling of the mixture.

KEYWORDS: asphalt rubber; rubberized asphalt; dosage of asphalt mixtures; film thickness.

1 INTRODUÇÃO

Para que os pavimentos sejam duráveis, é premissa necessária, além do dimensionamento adequado e execução construtiva conforme o projeto, o uso de ligantes que promovam melhorias das características e propriedades mecânicas das misturas asfálticas, solução atrelada ao avanço na tecnologia de materiais. Para pavimentos flexíveis, algumas destas melhorias foram feitas com a modificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), adicionando polímeros, fibras sintéticas, fíleres e borracha granulada de pneus usados (Leite, 1999; Lucena *et al.*, 2004; Dantas Neto, 2004; Mello, 2008; Pamplona *et al.*, 2012; Yusoff *et al.*, 2013; Nuñez *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2017; Nunes, 2017; Bastidas-Martínez *et al.*, 2021, Lopes *et al.*, 2021 e Lopes, 2022).

O uso de borracha moída de pneu (BMP) em misturas asfálticas por via úmida (do tipo field blend) é praticado há anos nos Estados Unidos, com histórico de bom desempenho. No entanto, tem como desvantagens a necessidade de equipamento apropriado ao processo de fabricação instalado na usina de altas temperaturas de agitação do ligante modificado e de maior tempo de preparo.

A BMP pode ser adicionada ao concreto asfáltico como parte dos agregados ou como um agente modificador do ligante asfáltico. O tamanho, a forma e a textura da BMP necessários variam a depender da aplicação proposta (Heitzman, 1992). Diversos estudos abordam os

processos e as tecnologias empregadas durante a produção de misturas modificadas com borracha, a qual pode ser obtida por meio de dois processos principais: seco e úmido (Heitzman, 1992; Bahia e Davis, 1994; Epps, 1994; Abdelrahman e Carpenter, 1999; Visser e Verhaeghe, 2000; Takallou e Takallou, 2003).

No Brasil é mais comum a produção de mistura asfalto-borracha (AB) a partir do ligante modificado na distribuidora (do tipo terminal blend), que consome uma menor quantidade de borracha e adiciona óleos extensores durante sua produção. Misturas asfálticas obtidas com esse tipo de AB apresentam pior desempenho mecânico quando comparado às misturas produzidas pela via úmida (do tipo field blend) (Shatnawi, 2011). Pesquisas desenvolvidas em universidades brasileiras, considerando diferentes vias de modificação, vêm mostrando as melhorias da incorporação de borracha às misturas asfálticas (Oda, 2000; Salini, 2000; Specht, 2004; Dantas Neto, 2004; Pinheiro, 2004; Wickboldt, 2005; Faxina, 2006; Mello, 2008; Fontes, 2009; Camargo, 2016; Nunes, 2017 e Lopes 2022).

A *Reacted and Activated Rubber* (RAR) foi desenvolvida com a proposta de simplificação do processo de usinagem (como o realizado na mistura asfáltica obtida pela via seca) e obtenção de desempenho da mistura asfáltica superior (como a mistura asfáltica obtida pela via úmida, segundo a técnica empregada na terminologia do tipo field blend), além da utilização de uma maior

porcentagem de borracha e um processo de mistura a temperaturas mais baixas. Esses materiais, quando adicionados a um CAP de base, apresentam características aceitáveis de AB, normatizado pela ASTM D 6114/09 (Lopes *et al.*, 2021).

Nos projetos de misturas asfálticas é desejada uma distribuição de agregados que resultem em maior intertravamento do esqueleto mineral. Devido às partículas de borracha, notou-se que o ligante AB proporcionaria uma maior espessura do filme de ligante (*TF*, fim thickness) em relação a ligantes convencionais. Dessa forma, observou-se a necessidade de ajustar a granulometria do agregado, para se ter uma grande quantidade de Vazios no Agregado Mineral (VAM).

Segundo Nanjegowda *et al.* (2020), a RAR pode ser considerada interagindo como agregado ou como ligante, dentro da mistura asfáltica, e tais considerações resultarão em diferentes *TFs*. No referido estudo, os autores desenvolveram a metodologia para o cálculo de *TF* associando essa variável aos resultados de campo (surgimento de trincas e desagregação) em 18 misturas de diferentes granulometrias, sem modificação e modificadas com RAR.

Assim, o objetivo do presente artigo foi avaliar a metodologia de cálculo do *TF* de Nanjegowda *et al.* (2020), aplicada na dosagem de uma mistura asfáltica de granulometria descontínua usinada a quente, a qual foi produzida em laboratório com adição de RAR. Posteriormente, os resultados obtidos foram comparados aos valores de referência presentes nas pesquisas de Nanjegowda *et al.* (2020) e Shah (2018).

2 REACTED AND ACTIVATED RUBBER – RAR

Chavez *et al.* (2019) denominaram a utilização da RAR na produção de misturas

asfálticas como um processo de produção de AB semiúmido, uma vez que a BMP é submetida a um pré-tratamento, em uma etapa de digestão prévia, como ocorre na produção do ligante AB por via úmida (field blend), sendo diretamente adicionada no misturador da usina como um material seco durante a produção da mistura asfáltica.

A RAR é composta por asfalto convencional, granulado fino de borracha (usualmente passando na peneira Nº 30) e por material de enchimento (fíler) em porcentagens devidamente otimizadas (Ishai *et al.*, 2011). Geralmente, a RAR consiste em cerca de 62 a 65 % de borracha moída, 20 a 25 % de asfalto convencional e 15 a 20 % de fíler. Durante a produção, o CAP utilizado apresenta característica de menor rigidez, permitindo uma melhoria na viscosidade, que garante a trabalhabilidade dos ligantes, mesmo em caso de utilização de maior teor de borracha (Shah, 2018).

Nunes (2017) destaca as vantagens de logística no transporte e produção, pelo fato de o material poder ser armazenado de forma ensacada em grandes quantidades, não depender instalações específicas na planta de usinagem e não necessitar aquecimento prévio. A possibilidade de armazenamento e facilidade no transporte contribuem para diminuir o desperdício de massa asfáltica devido à logística no tempo de entrega e aplicação da mistura em campo.

Sousa *et al.* (2012) ressaltam que a RAR pode ser adicionada a qualquer tipo de mistura asfáltica usinada a quente e orientam sobre as seguintes utilizações em substituição de parte da massa de ligante asfáltico contido nos diferentes tipos de misturas:

- (i) Misturas densas: até 20 % do teor de ligante da mistura;

- (ii) Misturas SMA: até 30 % do teor de ligante da mistura;
- (iii) Misturas descontínuas: até 40 % do teor de ligante da mistura;
- (iv) Misturas abertas: até 50 % do teor de ligante da mistura.

Sousa *et al.* (2012) comentam que há um melhoramento significativo das propriedades do ligante, que pode ser observado quando a adição de RAR é superior a 15 %. Além disso, os autores também ressaltam que existe certa quantidade de adição do material a partir do qual não haverá ligante disponível na mistura de forma suficiente para envolver adequadamente os agregados, ou a viscosidade se torna demasiadamente elevada. Ainda segundo os autores, tal fato ocasiona um aumento do Volume de Vazios (Vv) e de Vazios no Agregados Minerais (VAM) na mistura compactada para além dos limites aceitáveis, podendo ocorrer ainda um envolvimento parcial dos agregados.

Encontros da comunidade que se dedica às pesquisas com utilização de asfalto borracha intituladas de *Rubberized Asphalt Rubber – RAR, Conferences* ou conferência do asfalto emborrachado ou ainda conferência do asfalto-borracha, ocorrem desde o ano 2000 e podem ser mencionados diversos estudos sobre a aplicação do material RAR em misturas asfálticas nas escalas campo e laboratório (Manica *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2018; Shah *et al.*, 2018; Alsaad *et al.*, 2018). No Brasil, os trabalhos de Nunes (2017) e Lopes *et al.* (2021), que são pesquisas da primeira autora deste artigo, representam a primeira aplicação do material em pesquisa de misturas asfálticas desenvolvidas em laboratório.

3 METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

As pesquisas de Nunes (2017) e Lopes *et al.* (2021) evidenciaram, para os materiais e condições ensaiadas, que a modificação por RAR em 30 % (em massa de ligante), tanto para as modificações realizadas no ligante base quanto na mistura asfáltica, apresentaram o melhor desempenho à fadiga. Dessa forma, no presente estudo, adotou-se tal proporção de modificação.

Para fins de comparação, foi idealizada a produção de uma Mistura de Controle (MAC), adotando a granulometria *gap-graded* e ligante CAP 50/70 sem modificação, e uma Mistura Asfalto-Borracha com RAR (MAB-R30), com a mesma granulometria *gap-graded*, ligante CAP 50/70 e adição de RAR na proporção de 30 % em massa de ligante.

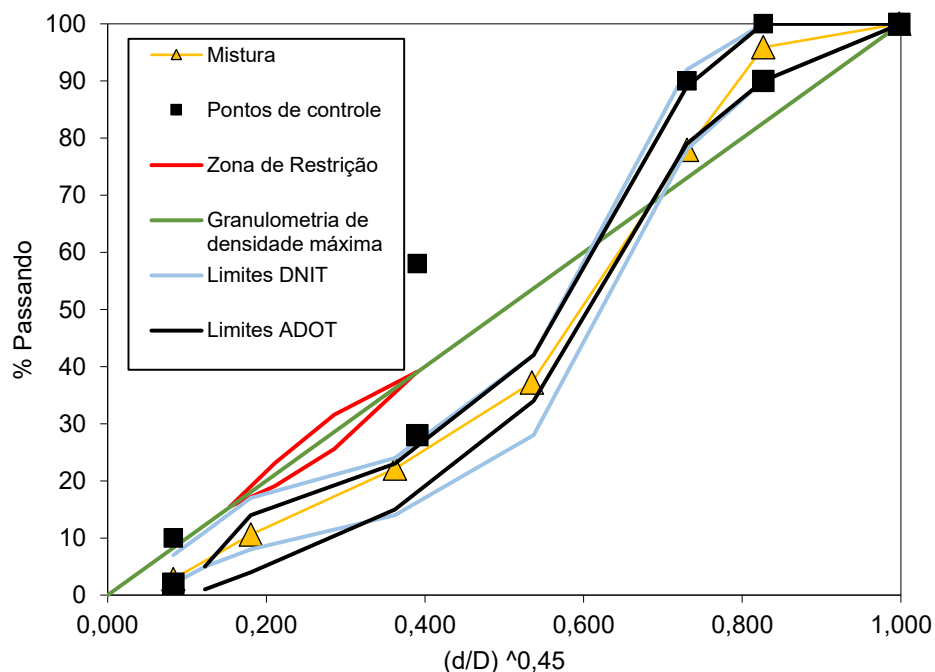
A composição granulométrica *gap-graded* é comumente empregada nos estudos referentes à produção de misturas asfalto-borracha. Essa granulometria se caracteriza pela distribuição de forma descontínua dos agregados, contendo pouca ou nenhuma quantidade de uma ou duas frações miúdas, promovendo maior contato entre os agregados graúdos (Caltrans, 2003). O *Asphalt-Rubber Standard Practice Guide* (ARPG, 1989) *apud* Sousa *et al.* (2006) mostram que o AB apresenta melhor desempenho quando incorporado a uma mistura de granulometria graúda, com maiores valores de VAM, uma vez que o asfalto-borracha possui valores de viscosidade elevada quando comparado a um asfalto convencional.

A composição granulométrica da mistura respeitou os limites mínimos e máximos da faixa descontínua recomendados pelo Departamento de Transporte do Arizona (ADOT) e pelo DNIT (DNIT 112/09-ES), como é apresentado na Tabela 1 e na Figura 1.

Tabela 1 – Distribuição granulométrica da mistura e faixas de limite do ADOT e DNIT

Tamanho da malha (") (mm)	d/D ^{0,45}	Porcentagem passando (%)				Retida (%)
		Limites ADOT	Limites DNIT	Mistura		
3/4"	19,1	100	100	100	100	-
1/2"	12,5	90	100	90	100	4,1
3/8"	9,5	79	89	78	92	18
Nº 4	4,8	34	42	28	42	40,7
Nº 10	2	15	23	14	24	15,1
Nº 40	0,425	4	14	8	17	11,5
Nº 80	0,18	-	-	5	11	7,8
Nº 200	0,075	1	5	2	7	2,8

Fonte: ADOT e DNIT 112/09-ES (2009)

Figura 1 – Curva granulométrica adotada, limites máximo e mínimo segundo a faixa do DNIT, plotados juntamente com a curva de densidade máxima, pontos de controle e zona de restrição para o TNM de 12,5mm

Fonte: Elaboração própria

Para a mistura de controle, MAC, foram testadas as porcentagens de teor de projeto de 5,0; 6,5; 7,0 e 8,0 % de ligante. Para a mistura modificada com RAR, MAB-R30, foram testadas as porcentagens de teor de ligante de 6,0; 6,5; 7,0 e 8,0 %. A mistura depois de pronta foi mantida em estufa, a fim de simular o envelhecimento a curto prazo, por 2 horas, utilizando a mesma temperatura em que seria posteriormente

compactada. Os moldes da compactação também foram inseridos na estufa à mesma temperatura. Foram produzidos no mínimo dois corpos de prova para cada teor, de cada mistura estudada, utilizando-se o molde de 150 mm de diâmetro. A Tabela 2 apresenta a configuração de temperaturas utilizada no processo de dosagem das misturas MAC e MAB-R30.

Tabela2 – Temperaturas de mistura e compactação para MAC e MAB-R

Temperaturas (°)	MAC	MAB-R30
Agregado	165	190
Ligante	155	165
Mistura e Compactação	140-150	150-165

Fonte: Elaboração própria

A cada ciclo de produção de mistura, a massa de CAP 50/70 a ser adicionada foi corrigida em relação à massa de agregado pesada pós-estufa. Para a mistura MAB-R30, a massa de CAP 50/70 a ser adicionada foi corrigida em relação à substituição por RAR em 30 % de massa de ligante. Por exemplo: considerando 100 % em massa de mistura, no teor de 8,0 % de ligante, para a adição de 30 % de RAR nesse teor (2,4 %), a massa de ligante foi corrigida para 5,6 %.

A adição de RAR foi feita diretamente no ato da mistura, após o envolvimento de todos os agregados pelo ligante, respeitando um intervalo de 2 a 3 minutos de duração do tempo total da mistura. A metodologia de adição de RAR à

mistura difere da adotada em outras pesquisas encontradas. Shah *et al.* (2018) relatam a adição de RAR primeiramente aos agregados e posterior adição do ligante asfáltico à mistura. Entretanto, Sousa *et al.* (2012) recomendam o procedimento conforme realizado nesta pesquisa e em Nunes (2017).

Para a seleção do teor de projeto de ligante das misturas asfálticas foi estabelecido o Volume de Vazios (Vv) em 4,5 % e demais propriedades volumétricas dentro da faixa estipulada, conforme apresentado na Tabela 3. A Especificação de Serviço DNIT 112/09–ES regulamenta a produção de concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo *terminal blending*.

Tabela 3 – Propriedades volumétricas para misturas asfalto-borracha segundo DNIT 112/2009–ES

Propriedade	Limites (DNIT 112/09–ES)
Vv (%)	4-6
Teor de projeto (%)	5-8
VAM (%)	>14
RBV (%)	65-78

Fonte: DNIT 112/09–ES (2009)

4 METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DA ESPESSURA DO FILME DE LIGANTE TF

Foi reconhecido que misturas produzidas com filmes de ligante asfáltico mais espessos resultam em pavimentos flexíveis e duráveis, enquanto as misturas de filmes finos tendem a trincar, reduzindo a vida útil dos pavimentos (Campen *et al.*, 1959). Convencionalmente, a espessura do filme de ligante é definida como uma razão entre o volume de asfalto que não foi absorvido pelas partículas do agregado e a área de superfície do

agregado, sendo considerada uniforme para todas as partículas. A Equação 1 mostra como o cálculo é feito (Radovski, 2003):

$$TF = \frac{V_{asp}}{SA * W_{agg}} \quad (1)$$

Onde *TF* é a espessura do filme (m), *V_{asp}* é o volume efetivo de ligante (m³), *SA* representa a área de superfície (m²/kg) e *W_{agg}* a massa do agregado (kg).

O conceito de espessura de filme de ligante

asfáltico foi validado experimentalmente usando análises microscópicas. Elseifi *et al.*, 2008 relataram que os filmes de ligante para grandes partículas de agregado são de forma irregular e consistem em uma mistura do ligante com agregado fino e filer. Os mesmos autores também verificaram que a espessura do filme pode ser superior a 100 μm para agregados mais graúdos e menor que 2 μm para pequenas partículas de agregado. É improvável que as partículas de uma mistura tenham espessuras de filme de ligantes uniformes. Para fins práticos, tem-se admitido que partículas muito pequenas (*filer*) estão incorporadas ao filme, formando uma argamassa asfáltica (Kandhal e Chakraborty, 1996).

A RAR atua como um filer seco e muito áspero, portanto torna-se extremamente importante verificar sua superfície específica gravimétrica (SA) e a espessura do filme de ligante quando ocorre a sua utilização. A metodologia utilizada neste artigo para obter *TF* foi a mesma utilizada por Shah (2018) e descrita com detalhe no trabalho de Nanjegowda *et al.* (2020). Segundo os autores, a RAR pode ser considerada interagindo como agregado ou como ligante dentro da mistura asfáltica, e tais considerações resultarão em diferentes *TFs*. A seguir é descrito um passo a passo sobre o ajuste granulométrico e obtenção da SA:

- Obter as porcentagens de asfalto e agregado que compõem a mistura asfáltica, com a correção do valor efetivo de ligante asfáltico a partir da adição de RAR (nesta pesquisa, em 8 % de ligante, sendo 2,40 % de RAR e 5,60 % de CAP 50/70 e 92 % de agregados);
- Ajustar a distribuição granulométrica dos agregados, considerando a correção da porcentagem de RAR;
- Ajustar o fator área de superfície SA_{Fi} específico para cada peneira, por meio da

Equação 2:

$$SA_{Fi} = 1,93 \cdot p^{-1,0221} \quad (2)$$

Onde SA_{Fi} é o fator área de superfície de cada peneira, p é a porcentagem de agregado que passa na peneira, e $1,93e^{-1,0221}$ são constantes, considerando os valores tabelados, fornecido pelo MS-2 (Asphalt Institute, 2014).

- Obter o valor de $SA_{Agregados}$ por meio da Equação 3:

$$SA_{Agregados} = \sum p_i \cdot \frac{SA_{Fi}}{100} \quad (3)$$

Em que $SA_{Agregados}$ é a área de superfície total dos agregados, p_i é a porcentagem passando em cada peneira e SA_{Fi} é o fator da área de superfície específica de cada peneira obtido da etapa anterior.

Após a obtenção de SA em função dos agregados, é necessário obter o valor de SA para o material RAR. Para isso, são realizados os mesmos passos anteriores, considerando o valor em porcentagem de RAR presente na mistura (2,40 %), a distribuição granulométrica da RAR e o seu fator de área de superfície SA_{FiRAR} específico de cada peneira é dado pela Equação 4:

$$SA_{FiRAR} = 10 \cdot SA_{Fi} \quad (4)$$

O valor de SA_{Fi} , para a RAR interagindo como agregado na mistura é dado pela Equação 5:

$$SA_{RAR-Agregado} = \sum p_i \cdot \frac{SA_{Fi}}{100} + \left(cp_i \cdot \frac{SA_{Fi}}{100} + ap_i \cdot \frac{SA_{FiRAR}}{100} \right) \quad (5)$$

Onde $SA_{RAR-Agregado}$ é a área de superfície total do agregado combinado com a RAR, cp_i é o valor corrigido da porcentagem de agregado que passa em cada peneira, ap_i é o valor ajustado de RAR que passa em cada peneira e SA_{FiRAR} é o fator área de superfície da RAR como agregado passando em cada peneira.

Para a obtenção da SA da RAR combinada com o ligante, são realizados os seguintes

passos:

- Considerar a distribuição granulométrica da RAR obtida em Nanjegowda *et al.* (2020);
- Ajustar o fator área de superfície SA_{FRAR} específico para cada peneira, por meio da Equação 6:

$$SA_{FRAR} = 19,44 \cdot p_{RAR}^{-1,0616} \quad (6)$$

Em que SA_{FRAR} é o fator área de superfície para os grãos de RAR, p_{RAR} é porcentagem de RAR que passa na peneira e 19,44 e -1,0616 são constantes, considerando os valores tabelados, fornecido pela MS-2 (Asphalt Institute, 2014);

- Obter o valor de SA_{RAR} por meio da Equação 7:

$$SA_{RAR} = \sum SA_{FRAR} \cdot \frac{\text{Porcentagem de RAR na mistura}}{100} \quad (7)$$

O valor de SA final, para a RAR combinada interagindo como ligante na mistura, é dado pela Equação 8:

$$SA_{RAR-Ligante} = SA_{Agregado} + SA_{RAR} \quad (8)$$

E assim, a espessura do filme de ligante, TF , pode ser calculada de duas formas, combinando a ação da RAR como agregado (Equação 9) e como ligante (Equação 10):

$$TF = \frac{V_{asp}}{SA_{RAR_agregado} \cdot W_{agg}} \quad (9)$$

$$TF = \frac{V_{asp}}{SA_{RAR_ligante} \cdot W_{agg}} \quad (10)$$

Onde TF é a espessura do filme (m), V_{asp} é o volume efetivo de ligante (m³), $SA_{RAR_Agregado}$ representa a área de superfície da RAR combinada com o agregado na mistura (m²/kg), $SA_{RAR_Agregado}$ representa a área de superfície da RAR combinada com o ligante na mistura (m²/kg) e W_{agg} a massa do agregado (kg).

Shah (2018) relata que certo fabricante, tendo por experiências projetos anteriores, recomenda uma espessura mínima de filme de 10 µm, e um fator de superfície, um multiplicador que permite

calcular a SA da RAR no valor de 10, evitando, assim, aparecimento de trincas e desagregação na mistura asfáltica. Nanjegowda *et al.* (2019) estudaram resultados de espessura de filme de ligante em 18 misturas de diferentes granulometrias, sem modificação e modificadas com RAR e recomendam que o valor mínimo de TF seja de 12 µm.

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA RAR POR MEIO DO ANALISADOR DE PARTÍCULAS

A RAR em seu estado físico antes da inclusão em misturas asfálticas é uma substância seca cinzenta/preta com uma densidade aparente de aproximadamente 0,6 g/cm³. Apresenta tamanhos de partículas individuais abaixo de 600 µm, concentrando grande parte destas na faixa de 250-600 µm (Plati e Cliatt, 2021).

A distribuição granulométrica da RAR pode ser encontrada no trabalho de Nanjegowda *et al.* (2020) em que os autores desenvolveram considerações sobre a forma de cálculo da espessura do filme de ligante ao se utilizar RAR em uma mistura. Essa abordagem foi explanada no item 4.

Uma vez que a RAR é composta por BMP, ligante asfáltico e filler, materiais heterogêneos e que assumem diferentes dimensões após o processo de fabricação, a fim de se verificar a sua distribuição granulométrica, foi utilizado o analisador de partículas. Esse equipamento, fabricado pela MICROTRAC, possui um sistema de análise de partículas da série 5000 SYNC que é uma combinação de tecnologias que integra duas técnicas de medição ótica bem estabelecidas num único instrumento: análise de Difração a Laser (LD) e Imagem Dinâmica (DI), que permitem obter a distribuição estatística do tamanho e da forma das partículas.

Segundo o manual de operação e

manutenção que acompanha o instrumento, na análise por LD, a luz dispersa de múltiplos feixes de laser projetados por meio de um fluxo de partículas, é medido por matrizes de detectores óticos. Na análise DI, a luz obscurecida por um LED intermitente é posicionada atrás de um fluxo de partículas detectado por uma câmera de alta velocidade/ alta resolução.

O analisador SYNC capta essas duas medições, utilizando uma técnica patenteada que integra e sincroniza a coleção de luz das duas tecnologias simultaneamente por meio de uma

única célula de medição. Utiliza-se um software, instalado junto ao equipamento, para analisar os resultados de cada técnica e apresentar os dados. Os dados podem ser analisados independentemente por tecnologia ou misturados num único dado de apresentação. O procedimento poderá ser realizado em meio seco ou úmido, dependendo das características da amostra e da configuração do sistema. Mostra-se, na Figura 2, o equipamento em que foram realizados os ensaios.

Figura 2 – a) Visão geral do equipamento analisador de partículas da Microtrac; b) Carregamento da amostra no equipamento para a análise das partículas de RAR



Fonte: Elaboração própria

Para se analisar as partículas de RAR, realizaram-se testes preliminares visando estabelecer as configurações do ensaio, segundo a aplicação de adequada taxa de fluxo no meio aquoso e aplicação de ultrassom, o que mantém o fluxo de partículas em meio aquoso e dispersa possíveis conglomerados de partículas (espécie de defloculante com ação física), respectivamente, melhorando a identificação dos tamanhos e formas.

Nesse estudo, foram investigados os tamanhos de partículas na faixa de valores entre $2000\ \mu\text{m}$ e $0,02\ \mu\text{m}$ com a configuração LD de três lasers vermelhos em meio úmido. Foi aplicada taxa de fluxo de 80 % e aplicação de ultrassom.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

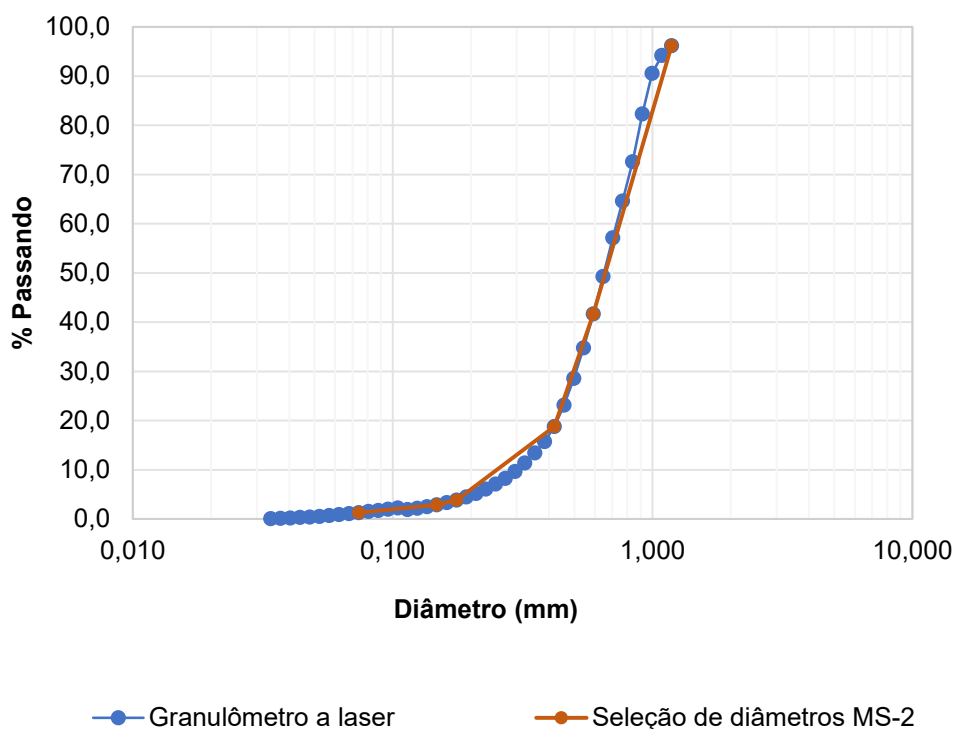
A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos, destacando-se primeiramente a determinação do filme de ligante e o estudo de dosagem.

5.1 FILME DE LIGANTE TF

Ressalta-se que, para o cálculo da espessura do filme de ligante desenvolvido por Nanjegowda *et al.* (2020) em misturas que utilizam a RAR na composição, são considerados os valores tabelados de aberturas de malha de peneiras e as respectivas superfícies específicas, fornecidas pela MS-2 *Asphalt Institute* (2014). Dito isso, tendo em vista a curva granulométrica dos agregados utilizados na mistura e a curva granulométrica da RAR, merece atenção a sequência de peneiras que foram consideradas no cálculo: 4,75; 2,36; 1,18; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075 mm.

Uma etapa importante nos cálculos da espessura do filme de ligante foi a obtenção da curva granulométrica da RAR obtida por meio do analisador de partículas. Na Figura 3, são observadas a disposição de duas curvas granulométricas: (1) todos os tamanhos de diâmetros observados na RAR nos ensaios realizados no analisador de partículas; (2) tamanhos de diâmetros observados na RAR no ensaio do analisador de partículas, com seleção dos valores presente no MS-2 *Asphalt Institute* (2014).

Figura 3 – Distribuição granulométrica da RAR obtida por meio do analisador de partículas



Fonte: Elaboração própria

De acordo com as equações apresentadas no item 4, as espessuras do filme de ligante para a granulometria estabelecida, assim como a combinação *RAR_agregado* e *RAR_ligante* foram

calculados. Na Tabela 4 e na Tabela 5 apresentam-se exemplos das planilhas utilizadas para o cálculo da espessura do filme de ligante TF.

Tabela 4 – Exemplo de cálculo de *TF* considerando *SA_{Agregado}* e *SA_{RAR-Agregado}* para 8,0 % de ligante sendo, 5,60 % de CAP50/70 e 2,40 % de RAR

Malha (mm)	% Passando Mistura	Ajuste granulométrico Agregados	SA_{FI} (MS-2; Asphalt Institute)	SA_{Agreg}	% RAR Passando	Ajuste granulométrico RAR	AS_{FIRAR}	$SA_{RAR-Agregado}$	
19,1	100	97,6			-	-	-		
12,5	95,9	93,6	0,41	0,41	-	-	-	0,41	
9,5	77,9	76,0			-	-	-		
4,8	37,2	36,3	0,4	0,14	-	-	-	0,14	
2	22,1	21,6	1,0	0,21	-	-	-	0,21	
1,18	-	-	1,6	-	96,2	2,3	16,25	0,38	
0,6	-	-	3,3	-	41,7	1,0	30,93	0,31	
0,425	10,6	10,3	4,6	0,49	18,8	0,5	49,00	0,70	
0,18	-	-	11,2	-	3,9	0,1	122,93	0,11	
0,15	-	-	13,4	-	2,9	0,1	147,76	0,10	
0,075	2,8	2,7	27,3	0,76	1,3	0,0	308,41	0,84	
$\sum SA_{Agregado}$				2,02	$\sum SA_{RAR-Agregado}$				3,21
TF				43,03	TF				18,98

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5 – Exemplo de cálculo de *TF* considerando *SA_{RAR-Ligante}* para 8,0% de ligante sendo, 5,60 % de CAP50/70 e 2,40% de RAR

Malha (mm)	(%) RAR Passando	<i>SA_{F-RAR}</i>	<i>AS_{-RAR}</i>
1,18	96,2	0,15	0,004
0,6	41,7	0,37	0,009
0,425	18,8	0,86	0,021
0,18	3,9	4,64	0,111
0,15	2,9	6,27	0,150
0,075	1,3	14,96	0,359
Σ <i>AS</i> (Com RAR)			2,67
<i>TF</i>			22,76

Fonte: Elaboração própria

O procedimento exemplificado nas Tabelas 4 e 5 foi realizado para todos os teores de dosagem sendo os resultados resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo dos resultados de *SA* e *TF* para a etapa de dosagem das misturas asfálticas

MAC			MAB				
Teor (%)	SA (m ² /kg)	TF (μm)	Teor (%)	RAR como agregado		RAR como ligante	
5	2,02	26,05	-	SA (m ² /kg)	TF (μm)	SA (m ² /kg)	TF (μm)
6,5	2,02	34,40	6	2,91	15,35	2,51	17,79
6,7	2,02	35,54	6,5	2,99	16,30	2,55	19,07
7	2,02	37,25	7	3,06	17,22	2,59	20,32
8	2,02	43,03	8	3,21	18,98	2,67	22,76

Fonte: Elaboração própria

Uma vez que a granulometria aplicada nas misturas foi fixada, a fim de se atingir o Vv e demais parâmetros volumétricos, é possível observar que, com o aumento do teor de ligante, há consequente aumento nos valores de TF para a dosagem MAC. Significa dizer que, dentro da mesma granulometria e $SA_{Agregado}$, o volume disponível de ligante asfáltico aumenta, aumentando o valor de TF nessas misturas. Observa-se que, para o teor de ligante de 6,7 % selecionado na MAC, o TF é de 35,54 μm .

Para as misturas MAB-R30, observa-se que os valores de $SA_{RAR-Agregado}$ são maiores em todos os teores quando comparado aos valores de $SA_{RAR-Ligante}$. Isso ocorre devido ao fato de $SA_{RAR-Agregado}$ ser a soma da área de superfície do agregado com a influência da RAR, atuando como um fíler, que, ao contrário da granulometria da mistura, apresenta frações nas peneiras de abertura 0,18 e 0,15 mm, o que aumenta o valor da área de superfície, consumindo parte do ligante, como é observado ao se comparar os resultados de espessura do filme de ligante, TF .

Ao considerar a RAR como ligante, apesar do alto valor de fator de área de superfície considerado para a RAR, a correção dos valores de SA_{RAR} , a partir da porcentagem de adição do material presente na massa total da mistura (2,40 % em 8,0 % de ligante), contribuem para um valor de $SA_{RAR-Ligante}$ menor, aumentando o TF apresentado na mistura.

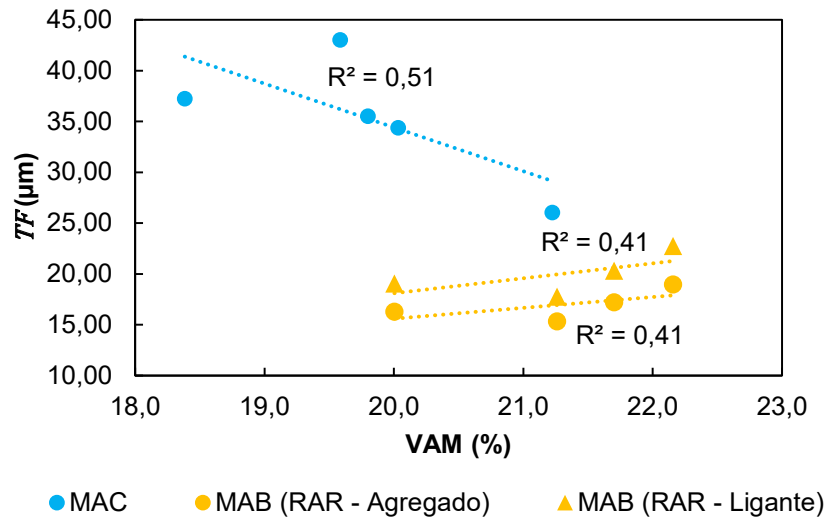
Com relação às espessuras do filme de ligante recomendadas por (Shah, 2018) e (Nanjegowda *et al.*, 2020) para misturas modificadas com RAR, pode-se afirmar que a mistura MAB-R30 em seu teor de projeto definido na etapa de dosagem (8 %) atende aos valores de TF que recomendados, sendo estes de 10 e 12 μm , respectivamente.

Os autores (Kandhal e Chakraborty, 1996) indicam que a faixa ideal da espessura do filme de ligante seria entre 9 μm e 10 μm . A partir da metodologia proposta por Duriez, STP1147 (1992), a espessura do filme de ligante é obtida com base no método da superfície específica em que se aplica o módulo de riqueza (k), com um valor mínimo especificado. Vale mencionar que a espessura do filme de ligante não é tratada como um parâmetro da etapa de dosagem, sendo recomendada a sua análise e observação como um indicador de possíveis ocorrências nas misturas como um direcionador.

Na Figura 4 e Figura 5 apresentam-se as relações obtidas entre as propriedades volumétricas da dosagem VAM e RBV com a espessura do filme de ligante. De uma maneira geral observa-se que o VAM apresentou baixa correlação com os valores de TF , enquanto o RBV apresentou boa correlação com TF nas misturas estudadas. Na mistura MAC o aumento do teor de ligante causa o aumento de TF e diminuição dos valores de VAM. Isso é justificado pela maior quantidade de ligante na mistura, para um mesmo valor de superfície específica de agregado, fazendo com que o ligante aja de forma a reduzir o Vv. Nas misturas MAB-R30 se observa que ao contrário, há aumento nos valores de VAM e consequente aumento de TF , fato que representa a atuação da RAR nestas propriedades.

O RBV apresentou correlação direta com os valores de TF em ambas as misturas para os teores de dosagem testados. Tal fato é esperado dado que o aumento na espessura do filme de ligante representa sua maior disponibilidade na mistura, ocorrendo em menores valores na MAB-R30 quando considerado a interação RAR-agregado devido ao aumento da superfície específica da mistura.

Figura 4 – Espessura do filme de ligante em função dos valores de VAM (%) das misturas

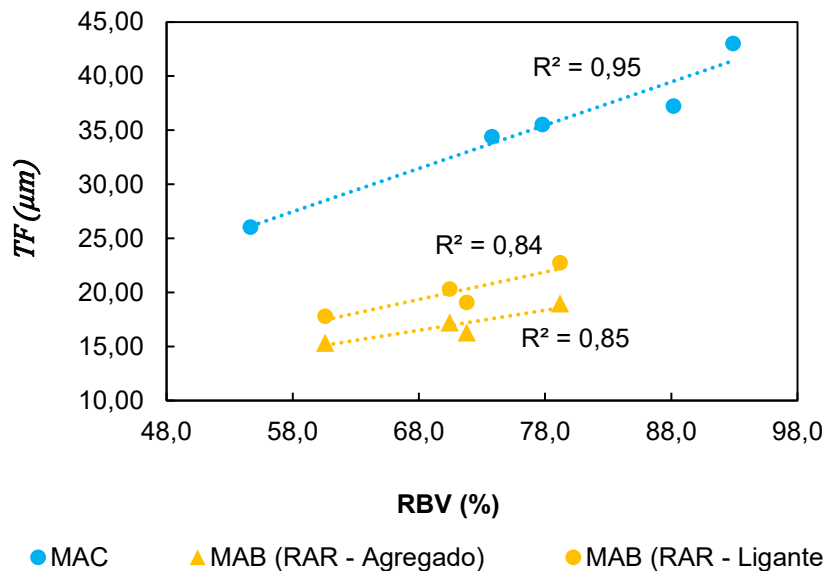


Fonte: Elaboração própria

Além de cumprir o valor estabelecido em pesquisas anteriores para o filme de ligante em misturas modificadas com RAR, os valores de TF encontrados também se encontram dentro da faixa de ocorrência estudada por Vieira *et al.*

(2019). Os autores estudaram a espessura de filme de ligante em matriz de agregado fino tendo como resultado a maior ocorrência da espessura do filme entre 0 μm e 50 μm , apesar da não uniformidade de distribuição por toda amostra.

Figura 5 – Espessura do filme de ligante em função dos valores de RBV (%) das misturas



Fonte: Elaboração própria

Além de cumprir o valor estabelecido em pesquisas anteriores para o filme de ligante em misturas modificadas com RAR, os valores de TF encontrados também se encontram dentro da faixa de ocorrência estudada por Vieira *et al.*

(2019). Os autores estudaram a espessura de filme de ligante em matriz de agregado fino tendo como resultado a maior ocorrência da espessura do filme entre 0 μm e 50 μm , apesar da não uniformidade de distribuição por toda amostra.

5.2 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

O projeto das misturas MAC e MAB-R30 foi realizado testando os teores de ligante descritos no item 3. A metodologia seguiu o protocolo *Superpave*, segundo é descrito no documento MS-2 do Asphalt Institute (2014). São apresentados na Tabela 5 e na Figura 6 os valores dos parâmetros volumétricos de volume de vazios (V_v), vazios no agregado mineral

(VAM), relação betume vazios (RBV) e densidade aparente são referentes a $N_{projeto}$. Os valores de critério da Tabela 7 incluem as faixas consideradas pela especificação DNIT 112 e pelo manual do *Asphalt Institute*. Destaca-se que, para a produção de misturas asfálticas modificadas por RAR, foram encontrados trabalhos que utilizam a metodologia de dosagem *Superpave* (Shah *et al.*, 2018) e Marshall (Chavez *et al.*, 2019).

Tabela 7 – Resumo das propriedades volumétricas nos projetos de dosagem das misturas MAC e MAB-R

Propriedade	MAC	MAB-R30	Critério
V_v (%)	4,5	4,5	4-6
Teor de projeto (%)	6,7	8	5-8
VAM (%)	19,8	22,2	>14
RBV (%)	77,8	79,2	65-78
% G_{mm} $N_{inicial}$	84,3	85,9	Máx 89

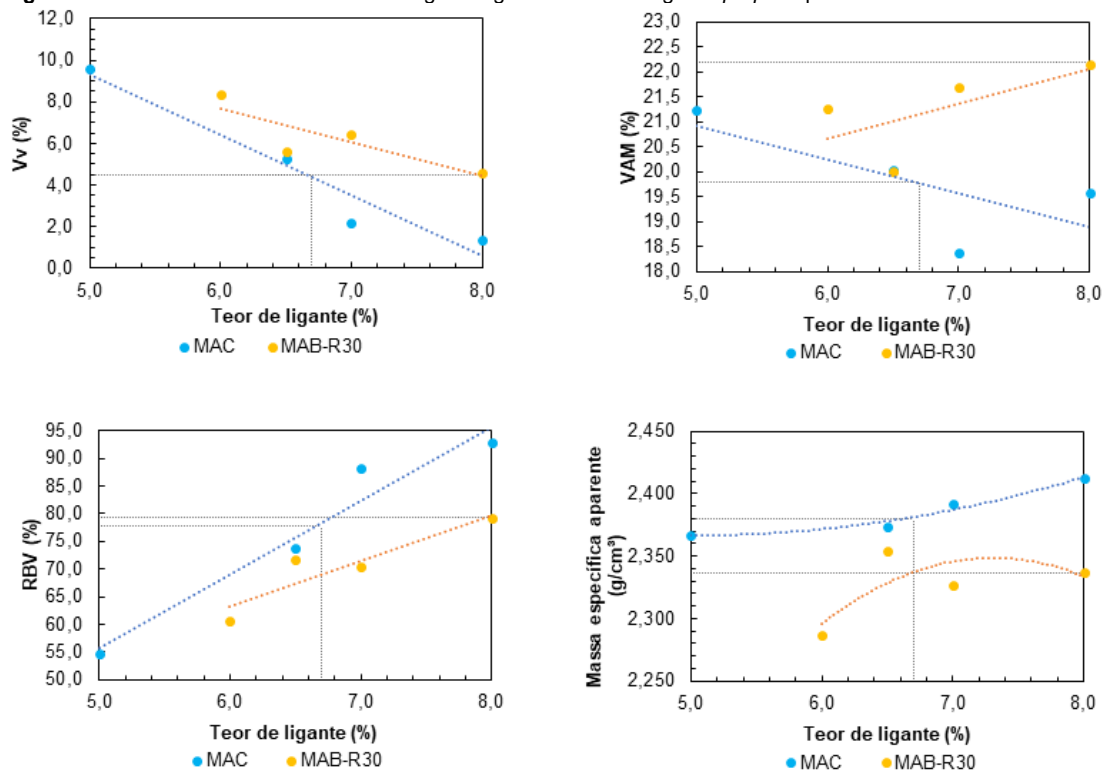
Fonte: Elaboração própria

O teor de projeto de ligante asfáltico obtido foi de 6,7 % para a mistura de controle e 8,0 % para a mistura modificada com RAR. No projeto de dosagem, buscou-se enquadrar os parâmetros volumétricos das misturas em faixas que obedecessem tanto aos critérios volumétricos da dosagem *Superpave* quanto da norma DNIT 119/2009–ES. Com relação ao teor de ligante, cabe lembrar que a referida norma estabelece limites para uso de asfalto-borracha do tipo *terminal blend*, o que difere da tecnologia utilizada. É comum que misturas AB, fabricadas por via úmida, consumam teores elevados de ligante asfáltico (Kaloush *et al.*, 2002; Mello, 2008; Souza *et al.*, 2012; Shah *et al.*, 2018; Alsaad *et al.*, 2018).

A partir dos resultados obtidos para a mistura MAB-R30, é possível avaliar a coerência dos resultados obtidos empiricamente no processo de dosagem da mistura de controle MAC. Na confecção da mistura MAB-R30, como mencionado no item 3.5, considerando 100 % em massa de mistura, no teor de 8,0 % de ligante,

para a adição de 30 % de RAR neste teor (2,4 %), a massa de ligante foi corrigida para 5,6 %. Como a RAR é composta também por ligante asfáltico na margem de 20 a 25 % no total de sua composição, é necessário considerar esta parcela de ligante contribuindo para o teor de ligante total da mistura. Dessa forma, em 2,4 % de RAR, considerando o valor de 25 % de ligante em sua composição, obtém-se 0,6 % de ligante disponível para compor a mistura asfáltica. Assim, é possível afirmar que a mistura MAB-R30 contém 6,2 % de teor de ligante, em 100 % de massa de mistura, em que 5,6 % provêm da adição de CAP 50/70 e 0,6 % da composição da RAR.

Ao observar os resultados plotados na Figura 6, no que diz respeito aos valores de V_v versus teor de ligante, é possível concluir que os dados empíricos da mistura MAC, tendo mesma origem e lote os materiais aplicados na mistura MAB-R30, demonstram que o valor de 6,2 % de ligante corresponde a um V_v de 5,8 %. Essa ocorrência exclui a elegibilidade do teor de 6,2 % como teor de projeto para a mistura MAC.

Figura 6 – Parâmetros volumétricos da dosagem segundo a metodologia *Superpave* para as misturas MAC e MAB-R30


Fonte: Elaboração própria

Pode-se afirmar que, ao estabelecer o valor de Vv a 4,5 % nas misturas MAC e MAB-R, avaliando-se a introdução da RAR na etapa de dosagem, os resultados mostraram que:

- Ambas as misturas apresentam diminuição do Vv com o aumento do teor de ligante na dosagem, sendo que a mistura MAB-R30 apresenta maiores valores de Vv quando comparado a mistura MAC para os mesmos teores de ligante, o que corresponde à introdução da RAR na mistura. Tal fato é atrelado ao aumento da viscosidade promovido pela adição da RAR, tornando o processo de compactação mais trabalhoso;
- Uma vez que os valores de VAM dependem do Vv e dos Vazios com Betume (VCB), apesar de o volume efetivo de ligante aumentar em ambas as misturas, MAB-R30 apresentou maiores valores de VAM, uma vez que possui maiores valores de Vv. Vale lembrar que, para as misturas modificadas

com ligante AB, é interessante a apresentação de elevados valores de VAM;

- Os valores de RBV correspondem à razão entre os valores de VCB e VAM. Como as misturas MAB-R30 apresentam maiores valores de VAM, consequentemente, são esperados menores valores de RBV;
- Os resultados da densidade aparente mostram que a introdução da RAR, que apresenta baixo valor de densidade aparente, sendo um material leve, faz com que esses valores na mistura MAB-R30 sejam menores que na mistura MAC em qualquer teor de ligante testado na etapa de dosagem.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa aplicou uma metodologia desenvolvida por (Nanjegowda *et al.*, 2020) visando à avaliação do filme de ligante *TF* em misturas asfálticas produzidas com a utilização de RAR. Dessa forma, tendo por base os resultados apresentados, pode-se concluir que:

- Foi possível observar que, com o aumento do teor de ligante, há consequente aumento nos valores de TF para a dosagem da MAC. Significa dizer que, dentro da mesma granulometria e $SA_{Agregado}$, o volume disponível de ligante asfáltico aumenta, aumentando o valor de TF nessas misturas;
- Para as misturas MAB-R30 observou-se que os valores de $SA_{RAR-Agregado}$ são maiores em todos os teores quando comparado aos valores de $SA_{RAR-Ligante}$. Isso ocorre devido ao fato de $SA_{RAR-Agregado}$ ser a soma da área de superfície do agregado com a influência da RAR, atuando como um fíler. Ao contrário da granulometria da mistura, esse apresenta frações nas peneiras de abertura 0,18 e 0,15 mm, o que aumenta o valor da área de superfície, consumindo parte do ligante, como é observado ao se comparar os resultados de espessura do filme de ligante, TF ;
- (Shah, 2018) e (Nanjegowda *et al.*, 2020) recomendam que a TF das misturas produzidas com RAR seja de 10 e 12 μm , respectivamente;
- Esses valores, conforme (Nanjegowda *et al.*, 2020), possibilitam o bom desempenho de misturas asfálticas, evitando o surgimento de defeitos comuns em campo, como as trincas por fadiga e a desagregação da mistura;
- A aplicação da metodologia de verificação de TF proposta por Nanjegowda *et al.* (2019) resultou em um TF de 35,54 μm para a mistura convencional MAC. Para a mistura modificada com RAR o valor de TF foi de 18,98 μm para RAR atuando como agregado, e de 22,76 μm para RAR atuando como ligante;
- A determinação da superfície específica da RAR é etapa fundamental para o cálculo do filme de ligante. Destaca-se a importância do

uso do analisador de partícula para a obtenção de dados de granulometria da RAR aplicados neste artigo;

- O teor de projeto de ligante asfáltico de 6,7 % para MAC e 8,0 % para MAB-R30 permitiu que as misturas apresentassem Vv de 4,5 %, como estabelecido, além de outras propriedades volumétricas apreciadas durante a dosagem dentro das faixas estabelecidas;
- Os teores determinados se encontram dentro da faixa esperada para o tipo de granulometria empregada. Além disso, os parâmetros volumétricos obtidos para MAB-R30 correspondem ao esperado para uma mistura AB.

O revestimento em concreto asfáltico é a camada mais nobre da estrutura do pavimento, tendo em vista que, comprovadamente, exerce maior influência de custo em obras rodoviárias. Portanto, diante dos resultados de dosagem, menciona-se que o aumento do teor de ligante em uma mistura com uso da RAR representará maiores gastos financeiros.

No entanto, é preciso considerar avaliações com relação à vida útil da camada de revestimento, comparando a utilização de MAC e MAB-R30. A MAB-R30 poderá apresentar ganhos quanto aos ciclos de manutenção e recuperação do pavimento, uma vez que se espera melhor desempenho à fadiga e deformação permanente. Portanto, a utilização de RAR demanda um maior investimento inicial na obra da rodovia, contudo poderá influenciar na redução de ciclos de intervenções no pavimento.

A avaliação quanto ao impacto financeiro do uso da RAR poderá ser realizada com a aplicação da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) a partir de resultados de desempenho mecânico entre MAC e MAB-R30.

REFERÊNCIAS

- ABDELRAHMAN, M. A.; CARPENTER, S. H. Mechanism of interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier. **Transportation Research Record**, v. 1661, n. 1, p. 106-113, 1999.
- ALSAAD, N.; MAHADI, V.; RICHARDS & KALOUSH, K. **Reacted and Activated Rubber (RAR) PG64-22 Binder Study**. Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: p. 367-381, 2018.
- ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. MS-4 Seventh Edition. USA. p. 788, 2007.
- BAHIA, H. U., & DAVIES, R. Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance related properties of asphalt binders. **Asphalt paving technology**, n.63, p. 414-414, 1994.
- CAMARGO, F. F. **Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt**. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, p. 161, 2016.
- CHAVEZ, F., MARCOBAL, J., & GALLEGOS, J. **Laboratory evaluation of the mechanical properties of asphalt mixtures with rubber incorporated by the wet, dry, and semi-wet process**. Construction and Building Materials, n. 205, p. 164-174, 2019.
- DANTAS NETO, S. A. 2004. **Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 265.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT. **DNIT 112/2009-ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending”**, Rio de Janeiro, 2009.
- FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação e Área de concentração em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, (1): p. 303, 2006.
- FONTES, L. P. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. 2009.
- ELSEIFI, M.A., AL-QADI, I.L., YANG, S.H. and CARPENTER, S.H. **Validity of asphalt binder film thickness concept in hot-mix asphalt**. Transportation Research Record, 2057(1), p. 37-45, 2008.
- EPPS, J. A. Uses of recycled rubber tires in highways. **Transportation Research Board**. v. 198, 1994.
- KALOUSH, K. E., WITCZAK, M. W., WAY, G. B., ZBOROWSKI, A., ABOJARADEH, M. & SOTIL, A. **Performance Evaluation of Arizona Asphalt Rubber Mixtures Using Advanced Dynamic Material Characterization Tests**. Final Report, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University, Tempe, Arizona, July 2002.
- KANDHAL, P. S., CHAKRABORTY, S. **Evaluation of voids in the mineral aggregate for HMA paving mixtures**. No. Report No. 9. National Center for Asphalt Technology, 1996.
- KUMARA, S.; VENUDHARAN, V.; BILIGIRIC, K. P. & SOUSA, J. B. **Performance Characterization of Reacted and Activated Rubber Modified Gap-Graded Asphalt Mixtures**. Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: p. 113-128, 2018.
- LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, IMA/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.
- LOPES, L. N., DE FARIAS, M. M., & DE MELLO, L. G. R. Fatigue tests and damage analyses in modified binders and gap-graded asphalt mixtures with Reacted and Activated Rubber–RAR. **Road Materials and Pavement Design**, 22(7), p. 1616-1636, 2021.
- LOPES, L. N. **Fadiga e Deformação Permanente em Ligante e Mistura Asfáltica Modificados com Borracha Pré-Tratada (RAR)**. Tese de Doutorado, Publicação 176/2022 Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 222, 2022.

- MANICA, D.; MIRANDA, H.M.B. & SOUSA, J.B.3. **Case study: Development of a new bituminous mixture “ThinGap with Reacted and Activated Rubber for Madeira Island”**. Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: p. 291-300, 2018.
- BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G., RONDÓN-QUINTANA, H. A., & MUNIZ DE FARIAS, M. Behavior of asphalt mastics containing different materials as filler. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 48(4), p. 347-355, 2021.
- MELLO, L. G. R. **A Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília/DF, p. 263, 2008.
- NANJEGOWDA, V. H., SILVA, F., SOUSA, J. B., WAY, G. B., & BILIGIRI, K. P. Forensic approach to predict film thickness of reacted and activated rubber (RARX) modified asphalt mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, 21(sup1), S19-S36, 2020.
- NÚÑEZ, J. **Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo**. Ms Thesis, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2013.
- NUNES, L. C. **Fadiga de Misturas Asfálticas Descontínuas com Asfalto-Borracha de 4ª Geração**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-281/17, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 142, 2017.
- ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2020.
- PAMPLONA, Thaís F. *et al.* Asphalt binders modified by SBS and SBS/nanoclays: effect on rheological properties. **Journal of the Brazilian chemical society**, v. 23, p. 639-647, 2012.
- PLATI, C., & CLIATT, B. Building Sustainable Pavements: Investigating the Effectiveness of Recycled Tire Rubber as a Modifier in Asphalt Mixtures. **Energies**, 14(21), 7099, 2021.
- PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco)**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 166 fl. 2004.
- RADOVSKIY, B. Analytical formulas for film thickness in compacted asphalt mixture. **Transportation Research Record**, 1829(1), p.26-32, 2003.
- SALINI, R. B. **Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. p. 120, 2000.
- SILVA, F.; MIRANDA, H.M.B. & SOUSA, J.B. **High performance mixtures: two new technologies brought together, ThinGap with RAR designed with i-Mix Design, a new mix design approach**. Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: p. 265-275, 2018.
- SHAH, J.; SRINIVASAN, A. & KALOUSH, K. **RAR: Superpave Mix Design and Performance Testing**. Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: p. 79-94, 2018.
- SHATNAWI, S. **Comparisons of Rubberized Asphalt Binders Asphalt Rubber and Terminal Blend**. Shatec Engeneering Consultants, LLC. Eldorado Hills, California, 2011.
- SOUSA, J. B., VOROBIEV, A., ISHAI, I., SVECHINSKY, G. Elastomeric Asphalt Extender – A New Frontier on Asphalt Rubber Mixes. **Asphalt Rubber 2012 – Proceedings**, Munich, Germany, p. 161-181, 2012.
- SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.
- TAKALLOU, H. B. & TAKALLOU M. B. Effects of mixing time and temperature on the visco-elastic properties of asphalt rubber binder. **Asphalt Rubber 2003 – Proceedings**, Brasília, Brazil, 2003, p. 589-602, 2003.

VIEIRA, L. H., OSMARI, P. H., ARAGÃO, F. T. S., SIMÃO, R. A., & DE REZENDE, L. R. **Procedimento experimental para a determinação da espessura do filme de ligante em matriz de agregado fino**. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da Anpet, 33, Balneário Camboriú, Santa Catarina, 2019.

VISSER, A. T. & VERHAEGHE, B. Bitumen rubber: lessons learned in South Africa. **Asphalt Rubber 2000 – Proceedings**, Vilamoura, Portugal: p. 33-50, 2000.

WICKBOLDT, V. S. **Ensaaios Acelerados de Pavimentos para Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2005.

WU, C., SOUSA, J. B., LI A. & ZHAO, Z. **Activated Minerals as Binder Stabilizers in Middle Course's Asphalt Concrete Paving Mixtures**. 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, January 2014.

YILDIRIM, Y. Polymer modified asphalt binders. Departament of Civil Engineering, Texas University at Austin. **Construction and Building Materials**. (21): p. 66–72, 2007.

YINFEI, D.; JIAQI, C.; ZHENG, Z.; WEIZHENG, L. A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods. **Construction and Building Materials** v. 168: p. 893 – 905, 2018.

YUSSOF, N. **Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders**. PhD Thesis, University of Nottingham, UK. 2012.

IRREGULARIDADE LONGITUDINAL: PREVISÃO DO COMPORTAMENTO FUNCIONAL DE PAVIMENTOS NO MÉTODO MeDiNa

PAVEMENT ROUGHNESS: PREDICTING THE FUNCTIONAL BEHAVIOR IN THE MeDiNa METHOD

Lucas Dotto Bueno - lucas.bueno@ufsm.br - <https://orcid.org/0000-0001-8171-4192>

Deividi da Silva Pereira - dsp@ufsm.br - <https://orcid.org/0000-0002-7200-7813>

Luciano Pivoto Specht - luspecht@ufsm.br - <https://orcid.org/0000-0002-8709-6273>

Henrique Otto Coelho - henrique.coelho@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0003-6275-7543> Jose

Antonio Santana Echeverria - jose.echeverria@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0002-3206-0545>

RESUMO: O comportamento funcional de uma rodovia é comumente avaliado de maneira quantitativa por meio da irregularidade longitudinal em sua superfície, representada pelo *International Roughness Index* (IRI). A popularização do IRI e dos sistemas de medição de irregularidade no cenário nacional cria uma oportunidade de inserção, dentro do novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), de um mecanismo de ruptura alternativo de avaliação, baseado no critério funcional, possibilitando a previsão do IRI ao longo do tempo. Os trabalhos de Bueno (2019) e Bueno *et al.* (2022) mostraram ser possível prever o comportamento do IRI ao longo do tempo, tanto em caráter empírico quanto mecanístico-empírico; todavia, a adequação dessa ferramenta no sistema MeDiNa não foi consolidada pelos autores. Dentro desse contexto, o presente trabalho apresenta, de maneira preliminar, estratégias que serão utilizadas na tentativa de fornecer uma possibilidade de incorporação da previsão de irregularidade na rotina de resultados do MeDiNa, como parte do Termo de Execução Descentralizada (TED) nº 545/2022, firmado entre a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). As estratégias propostas consistem em incorporar novos segmentos experimentais ao banco de dados compilado por Bueno *et al.* (2022), além de empregar rotinas empíricas e mecanístico-empíricas para prever a evolução do IRI ao longo do tempo, com base em pavimentos brasileiros, dentro da sistemática de operação do MeDiNa.

PALAVRAS-CHAVE: pavimentos asfálticos; irregularidade longitudinal de pavimentos; MeDiNa.

ABSTRACT: The functional behavior of a highway is commonly quantitatively evaluated through the roughness on its surface, represented by the *International Roughness Index* (IRI). The popularization of IRI and roughness measurement systems on the national scene creates an opportunity to insert, within the new National Pavement Dimensioning Method (MeDiNa), an alternative failure evaluation, based on the functional criterion, enabling the IRI prediction over time. The studies developed by Bueno (2019) and Bueno *et al.* (2022) showed that it is possible to predict the IRI behavior over time, both empirically and mechanistic-empirically; however, the adequacy of this tool in the MeDiNa system was not consolidated by the authors. Within this context, the present paper presents, in a preliminary way, strategies that will be used in an attempt to incorporate the roughness prediction in the MeDiNa results,

as part of the Decentralized Execution Term (TED) nº 545/2022, signed between Federal University of Santa Maria (UFSM) and National Transport Infrastructure Department (DNIT). The proposed strategies are to incorporate new experimental sites to the database compiled by Bueno et al. (2022), in addition to employing empirical and mechanistic-empirical routines to predict the evolution of the IRI over time, based on Brazilian pavements, within the MeDiNa systematic of operation.

KEYWORDS: asphalt pavements; pavement roughness; MeDiNa.

1 INTRODUÇÃO

A irregularidade longitudinal medida na superfície é um dos principais parâmetros de avaliação das condições de funcionalidade de uma estrutura de pavimento rodoviário. Apesar de bastante difundidos, os índices que determinam e quantificam a irregularidade longitudinal envolvem uma série de aspectos que podem alterar a magnitude de seus resultados. No cenário nacional e internacional, o *International Roughness Index* (IRI) é considerado o principal quantificador dos desvios da superfície em relação a um plano ideal de referência, responsável por diagnosticar a ruptura funcional do pavimento a partir do grau de irregularidade em sua superfície.

A utilização do IRI como principal indicador do mecanismo de ruptura funcional fez com que, ao longo do tempo, os métodos de dimensionamento de pavimentos novos e restaurações adequassem a sua rotina de previsão também para assimilar os índices funcionais. Em trabalho pioneiro, Paterson (1987), com uso de boa parte do banco de dados compilado por Queiroz (1981), desenvolveu as bases do modelo de previsão de irregularidade incorporado ao *Highway Design and Maintenance Standards Model* (HDM-3), documentado pelo Banco Mundial em Watanatada et al. (1987).

Inspirados pelo trabalho de Paterson (1987), tanto no cenário nacional quanto internacional, surgiram variados modelos visando prever o desempenho funcional das estruturas de

pavimento, servindo como base para as tomadas de decisão de projetos rodoviários. No Brasil, importantes estudos já foram efetuados visando obter equações que representassem a progressão da irregularidade em rodovias revestidas por material asfáltico. Destacam-se os trabalhos realizados com implantação de trechos experimentais, tais como Yshiba (2003), Nakahara (2005) e Soncim (2011), que modelaram a progressão do IRI baseados em trechos restaurados em rodovias e vias urbanas.

No contexto de pesquisas realizadas dentro do Termo Execução Descentralizada (TED) nº 545/2022, a irregularidade longitudinal é tema central dos trabalhos de Bueno (2019), Pavi (2019), Bueno et al. (2022) e Scherer (2022). Nos trabalhos de Bueno (2019) e Bueno et al. (2022), foram apresentados modelos de previsão da irregularidade longitudinal ao longo do tempo, tanto em caráter empírico quanto em caráter mecanístico-empírico.

Com a experiência adquirida ao longo dos trabalhos supracitados, entende-se como possível atrelar o mecanismo de ruptura funcional na rotina de dimensionamento do sistema MeDiNa, mediante uso de modelos de previsão de desempenho de irregularidade longitudinal, como parte dos produtos a serem entregues no TED nº 545/2022, firmado entre a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Em vista disso, o presente trabalho busca apresentar os principais modelos presentes na literatura, referentes à progressão de irregularidade longitudinal, além de expor as estratégias preliminares que serão adotadas para possibilitar a introdução da previsão do IRI na sistemática de resultados do MeDiNa.

2 MODELOS DE PREVISÃO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

A irregularidade longitudinal vem sendo utilizada como uma importante ferramenta de aceitação de serviços, controle de obras rodoviárias, avaliação da qualidade do pavimento, determinação da necessidade de intervenção, escolha da alternativa de projeto mais adequada para a estrutura avaliada e determinação dos custos operacionais de usuários de rodovias. Ao longo dos anos, diversos pesquisadores desenvolveram modelos para avaliar a ruptura do pavimento por índices de irregularidade. Por si só, um modelo de previsão de evolução de irregularidade longitudinal de um pavimento pode estimar a qualidade de rolamento de sua superfície e determinar as necessidades de intervenções e restaurações.

2.1 MODELO DE QUEIROZ (1981)

Com base nos dados coletados na PICR (Pesquisa do Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias), Queiroz (1981) desenvolveu modelos de previsão de desempenho para a gerência de pavimentos no Brasil. O projeto experimental desenvolvido pelo autor envolveu dados de campo de pavimentos localizados na rede rodoviária dos estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e no Distrito Federal. O texto original foi publicado em 1981, em língua inglesa, em formato de tese de pós-doutorado do autor. Em 1984, o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR)

publicou uma versão traduzindo o referido documento para o português (Queiroz, 1984), disseminando ainda mais o conteúdo gerado.

O modelo de previsão de irregularidade desenvolvido pelo autor está exposto na Equação (1), determinada de forma empírica, relacionando efeitos estruturais, tráfego, idade e parâmetros de resistência e deformabilidade, baseado em medidas de campo. O estudo publicado pelo autor representou uma das primeiras tentativas de inserção da previsão de desempenho da irregularidade longitudinal na análise de pavimentos brasileiros. Dada a época da publicação, o indicador adotado por Queiroz (1981) foi o Quociente de Irregularidade (QI).

$$QI = 12,63 - 5,16 * RH + 3,31 * ST + 0,393 * AGE + 8,66 * \left(\frac{\log N}{SNC}\right) + 7,17 * 10^{-5} (D_{MAX} * \log N)^2 \quad (1)$$

$$R^2 = 0,56$$

Em que:

QI é o quociente de irregularidade (contagens/km);

RH é a variável indicadora do estado da restauração (como construído = 0; recapeado = 1);

ST é a variável indicadora do tipo de revestimento (concreto asfáltico = 0; tratamento superficial = 1);

AGE é a idade do pavimento desde a sua construção ou última reabilitação (anos);

N é o número acumulado de repetições do eixo padrão, calculado pelo método da AASHTO;

SNC é o Número Estrutural Corrigido;

D_{MAX} é a deflexão medida pela viga Benkelman abaixo do ponto de aplicação de carga (0,01 mm).

Posteriormente, a regressão estatística elaborada pelo autor foi adaptada e implantada no método nacional de projeto de restauração de pavimentos, regulamentada pela DNER-PRO 159/85 (DNER, 1985), objetivando prever a irregularidade em pavimentos existentes revestidos em concreto asfáltico (CA) ou

tratamento superficial (TS).

2.2 MODELO DO HDM-4 (ODOKI E KERALI, 2000)

Visando ampliar o escopo do HDM-3 e fornecer um sistema de abordagem de fácil acesso para a gestão rodoviária, com *software* e ferramentas acessíveis aos usuários, um estudo internacional liderado por variados pesquisadores resultou no *Highway Development and Management Tool* (HDM-4). A documentação que orienta a utilização do programa é constituída por sete volumes, desenvolvidos por variados autores que participaram deste processo, sendo a principal referência Odoki e Kerali (2000).

Kerali (2001) afirma que, no modelo de progressão de irregularidade, foi dada ênfase à aplicação do conhecimento existente, ao invés da realização de grandes estudos empíricos. Interpreta-se, assim, que o banco de dados é similar àquele utilizada no HDM-3, com base nas informações apresentadas por Queiroz (1981). Dessa forma, o modelo que prevê o comportamento da irregularidade longitudinal, aplicado ao HDM-4, é formado por variados componentes que contribuem para a evolução do IRI, sendo que o incremento total na irregularidade é dado pela soma destes componentes, expostos na Equação (2):

$$\Delta RI = K_{gp}(\Delta RI_S + \Delta RI_{TR} + \Delta RI_{ATR} + \Delta RI_P) + \Delta RI_E \quad (2)$$

Em que:

ΔRI é o incremento total na irregularidade durante o ano em análise (m/km);

ΔRI_{ATR} é o incremento na irregularidade devido ao afundamento em trilha de roda - ATR (m/km);

ΔRI_E é o incremento na irregularidade devido às condições ambientais (m/km);

ΔRI_P é o incremento na irregularidade devido à presença de painéis (m/km);

ΔRI_S é o incremento na irregularidade devido ao componente estrutural (m/km);

ΔRI_{TR} é o incremento na irregularidade devido ao trincamento (m/km);

K_{gp} é o fator de calibração para progressão da irregularidade.

Na versão 4 do HDM, o fator de calibração para progressão da irregularidade (K_{gp}) deve ser ajustado mediante alteração dos fatores referentes aos componentes que incrementam os acréscimos anuais de IRI, visando obter curvas de irregularidade próximas das séries históricas de dados do pavimento. Um guia sobre a calibração e adaptação dos fatores inseridos nos modelos de evolução dos parâmetros rodoviários previstos pelo HDM-4 pode ser encontrado em Bennett e Paterson (2000).

2.3 MODELO DA AASHTO (2008)

Divulgado como uma atualização do *Guide for Design of Pavement Structures* (AASHTO, 1993), o *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), publicado pela AASHTO (2008), surgiu com o objetivo de fornecer para a comunidade rodoviária uma ferramenta de projeto e análise de pavimentos novos e reabilitados, com base em princípios mecanístico-empíricos.

Em termos específicos da previsão de irregularidade longitudinal, Bhattacharjee (2016) descreve sua modelagem baseada em critérios de falha, tais como trincamento por fadiga, trincamento térmico, deformação permanente e irregularidade longitudinal, representada pelo IRI. A Equação (3) exhibe a evolução do IRI prevista pelo MEPDG para pavimentos asfálticos.

$$\begin{aligned} IRI &= IRI_i + 0,015(SF) + 0,4(TR_{TOTAL}) + 0,008(TT) \\ &\quad + 40,0(ATR) \end{aligned} \quad (3)$$

$$R^2 = 0,56$$

Em que:

ATR é o afundamento em trilha de roda médio (in);

IRI_i é a irregularidade inicial, após a construção (in/mi);

SF é o fator referente à pista;

TR_{TOTAL} é a área total envolvida por trincas de fadiga (%);

TT é o comprimento das trincas transversais (ft/mi).

AASHTO (2008) informa que a Equação (3) pode ser utilizada para avaliar o desempenho frente à irregularidade para pavimentos flexíveis convencionais (revestimento asfáltico sobre materiais granulares) e também para variações de estruturas semirrígidas, com presença de bases ou sub-bases cimentadas ou asfálticas.

O processo de calibração global da Equação (3) foi baseado em 1.926 valores de IRI observados em campo (dados coletados dentro do LTPP - *Long-Term Pavement Performance*), originando a estimativa final com erro padrão de 0,30 m/km. Todavia, salienta-se que a calibração do modelo foi realizada com observações de irregularidade de magnitude relativamente baixa (variando entre valores de IRI aproximados de 0,5 m/km a 3,2 m/km).

2.4 MODELO DE ABDELAZIZ ET AL. (2018)

Conforme ocorrido no desenvolvimento do modelo de previsão de desempenho publicado pela AASHTO (2008), para possibilitar a modelagem do IRI, Abdelaziz *et al.* (2018) também utilizaram resultados extraídos do banco de dados do LTPP.

A Análise de Variância (ANOVA) efetuada pelos autores indicou que a irregularidade inicial após o final do processo construtivo e a idade do pavimento após a construção ou reabilitação são as variáveis independentes que mais se associam com a irregularidade longitudinal ao longo do tempo, seguidas dos demais parâmetros avaliados. Depois de sucessivas tentativas de ajuste, o modelo de regressão mais assertivo, conforme escolha dos autores, está exposto na Equação (4):

$$\begin{aligned} IRI &= IRI_i + 0,015(AGE) + 0,004(TR_{TOTAL}) \\ &+ 0,0005(TT) + 0,089(DP_{ATR}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$R^2 = 0,57$$

Em que:

AGE é a idade do pavimento desde a sua construção ou última reabilitação (anos);

DP_{ATR} é o desvio padrão nas medidas de afundamento em trilha de roda (mm);

IRI_i é a irregularidade inicial, após a construção (m/km);

TR_{TOTAL} é a área total envolvida por trincas de fadiga (%);

TT é o comprimento das trincas transversais (m/km).

O erro padrão de estimativa que envolve o modelo elaborado por Abdelaziz *et al.* (2018) foi quantificado em 0,33 m/km. Os valores de irregularidade utilizados na composição do modelo oscilaram entre medidas de IRI determinadas em uma faixa de aproximadamente 0,4 m/km até, aproximadamente, 4,3 m/km.

2.5 MODELOS DE BUENO ET AL. (2022)

Em trabalho realizado considerando trechos experimentais monitorados nos estados do Rio de Janeiro/RJ e Rio Grande do Sul/RS, Bueno *et al.* (2022) consideraram 205 observações de IRI, espalhadas por 35 segmentos experimentais, no desenvolvimento de modelos de previsão de irregularidade longitudinal.

No formato mecanístico-empírico, os autores desenvolveram uma metodologia que associa o dano médio acumulado limitado (calculado com base em propriedades fundamentais dos materiais e o auxílio de programa computacional) e a irregularidade longitudinal medida na superfície ao longo do tempo, atrelada com um indicador inicial da qualidade de execução da implantação ou reabilitação de uma estrutura rodoviária ($IRI_{inicial} = IRI_i$), determinado após o término do processo construtivo, sem ação do

tempo/tráfego sobre a estrutura. Os autores também exibem um modelo em caráter tradicional, com base unicamente empírica, gerado a partir de informações coletadas ao longo do tempo em pistas experimentais nos estados avaliados. As expressões matemáticas estão expostas na Equação 5 (empírica) e Equação 6 (mecanístico-empírica):

$$IRI_{(t)} = IRI_i + [(3,54 \cdot 10^{-8} * N) + (1,42 \cdot 10^{-4} * (D_{MAX} * AT))] \quad (5)$$

$$R^2 = 0,77$$

$$IRI_{(t)} = IRI_i + (0,0124 * DANO_{LVECD} * AGE) \quad (6)$$

$$R^2 = 0,79$$

Em que:

AGE é a idade do pavimento desde a sua construção ou reabilitação (meses) no tempo “*t*”;

AT é a área do pavimento com presença de trincas (%) no tempo “*t*”;

DANO_{LVECD} é o dano médio limitado acumulado (calculado com o LVECD) no tempo “*t*”;

D_{MAX} é a deflexão FWD abaixo do ponto de aplicação de carga (0,01 mm) no tempo “*t*”;

IRI_i é a irregularidade inicial do pavimento após a construção ou reabilitação (m/km);

IRI_(t) é a irregularidade longitudinal prevista no pavimento (m/km) no tempo “*t*”;

N é o número acumulado de repetições do eixo padrão (método USACE) no tempo “*t*”.

A Equação 5 resultou em um valor de 0,41 m/km determinado como o erro padrão de estimativa. Já para a Equação 6, o erro padrão de estimativa resultante das previsões de irregularidade efetuadas foi quantificado em 0,39 m/km. Entende-se que, com base nos resultados gerados no estudo desenvolvido pelos autores, pode-se prever o desempenho funcional da estrutura do pavimento avaliado ao longo do tempo, tendo como parâmetro o desempenho da mistura asfáltica, analisada com base nas propriedades dos materiais, empregado em

associação a um indicador inicial da qualidade de execução da implantação ou reabilitação de uma estrutura rodoviária ($IRI_{inicial} = IRI_i$), determinado após o termino do processo construtivo, sem ação do tempo/tráfego sobre a estrutura.

3 INCORPORAÇÃO DA PREVISÃO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL NO MeDiNa

Cientes da necessidade de maiores evoluções nos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos, uma iniciativa integrada da Rede de Tecnologia em Asfaltos (fomentada pela ANP/PETROBRAS), juntamente com o antigo Instituto de Pesquisas Rodoviárias, atual Coordenação-Geral do Instituto de Pesquisas em Transportes - CGIPT - IPR/DNIT, a COPPE/UFRJ e uma série de instituições de ensino e pesquisa distribuídas geograficamente pelo Brasil, culminou em uma proposta de atualização no método de dimensionamento nacional de pavimentos asfálticos, regulamentada pela IS-247, que integra a Publicação IPR – 726 (2006) – Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários: escopos básicos/instruções de serviço. Isso representa um avanço em relação ao documento anterior, que é baseado na metodologia americana da década de 1920, implementado no Brasil em 1966, modificado em 1981 pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza (DNER, 1981).

O método adaptado pelo Engenheiro Murilo Lopes de Sousa, popularmente conhecido como Método do CBR/USACE, cumpriu um papel de extrema importância para o setor ao longo das últimas décadas; todavia, a migração para processos mecanístico-empíricos em países com maior capacidade econômica e tecnológica indicou um novo caminho para os projetos de pavimentos brasileiros.

Uma importante safra de pesquisas

nacionais, como a de Motta (1991), indicaram possibilidades para inserção de rotinas mecanístico-empíricas no desenvolvimento de projetos de pavimentos brasileiros revestidos por concreto asfáltico. Essa iniciativa resultou no trabalho desenvolvido por Franco (2007), que efetivamente propôs uma plataforma computacional, à época denominada “SisPav”, capaz de incorporar rotinas mecânicas às parcelas empíricas do dimensionamento. Os desdobramentos deste trabalho culminaram na elaboração do MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), documentado por Franco e Motta (2020) e viabilizado pelo TED nº 682/2014 (Processo nº 50607.002043/2013-00), firmado entre o DNIT e a UFRJ.

Em síntese, o MeDiNa constitui um sistema de dimensionamento de pavimentos que integra calibrações em campo mediante observações advindas de pistas experimentais monitoradas, resultados de ensaios laboratoriais para avaliação das propriedades dos materiais e cálculo de esforços gerados nas estruturas submetidas ao tráfego atuante. O novo método é de base mecanístico-empírica, ou seja, avalia os materiais de acordo com suas propriedades mecânicas para calcular tensões e deformações nas camadas, tornando o processo mais próximo da situação que efetivamente ocorre em campo, e possibilitando a previsão dos principais mecanismos de ruptura ao longo do tempo: trincamento por fadiga e deformação permanente (Medina e Motta, 2015; Franco e Motta, 2018 e 2020).

No âmbito prático, órgãos de administração rodoviária e empresas responsáveis por concessões espalhadas pelo país também demandam uma associação mais significativa entre o melhor desempenho dos pavimentos e um indicador funcional da qualidade da rodovia.

Ademais, a existência de uma previsão funcional, associada a modelos de desempenho com base em parâmetros estruturais e de tráfego, poderá, por exemplo, permitir a delimitação de bonificações ou penalizações para os executores responsáveis, já que a condição de trafegabilidade na superfície do pavimento interfere de maneira significativa nos custos operacionais demandados por usuários de rodovias.

Neste contexto, a possibilidade de previsão da evolução da irregularidade com o tráfego, representada pelo IRI, permitirá aos gestores rodoviários uma mais ampla tomada de decisões acerca de escolhas de misturas asfálticas e/ou estruturas de pavimentos que entreguem aos usuários menores custos operacionais, uma vez que a irregularidade do pavimento é um índice funcional atrelado à percepção de conforto percebida pelo usuário e também aos custos associados à utilização da via.

Vale salientar, todavia, que os indicadores de irregularidade longitudinal são parâmetros de abordagem relativamente complexa, principalmente quando são investigados os padrões de comportamento em campo destes índices. No decorrer do processo construtivo e da vida de serviço de uma estrutura rodoviária, o IRI pode ser influenciado por variados fatores que intensificam o processo de degradação do pavimento; desta forma, previsões de comportamento dos parâmetros de irregularidade são consideradas desafiadoras.

Dentro dessa temática, entende-se ser possível associar as etapas empíricas e mecanísticas, juntamente com um indicador inicial da qualidade de execução da implantação ou reabilitação de uma estrutura rodoviária ($IRI_{inicial} = IRI_i$, determinado após o término do processo construtivo, sem ação do tempo/tráfego sobre a

estrutura), em uma rotina de previsão de comportamento da irregularidade ao longo do tempo. Tal associação já se mostrou viável no decorrer dos trabalhos de Bueno (2019) e Bueno *et al.* (2022), em que foram empregadas rotinas mecanístico-empíricas para prever a evolução do IRI ao longo do tempo, com base em pavimentos brasileiros. Todavia, os resultados dos autores não foram atrelados à atual versão do MeDiNa e seus conceitos de danificação.

3.1 PREMISSAS ADOTADAS

No presente estudo, inicialmente, utilizou-se da análise estatística realizada por Bueno *et al.* (2022), que avaliou a associação e significância das variáveis independentes selecionadas na evolução da irregularidade longitudinal (variável dependente). Como etapa inicial do procedimento de análise de dados, Bueno *et al.* (2022)

selecionaram os parâmetros quantificados nos trechos monitorados, objetivando encontrar a sua representatividade na evolução da irregularidade longitudinal (variável dependente, representada pelo IRI, em m/km).

A Tabela 1 exibe as simbologias dos parâmetros explicativos escolhidos para modelar o fator de resposta representativo do IRI. Os parâmetros serão repetidos no presente estudo, com adição de uma variável independente mecânica, atrelada ao sistema MeDiNa (ainda a definir em etapas futuras da pesquisa). Essa variável mecânica possivelmente estará atrelada ao dano acumulado por fadiga, que considera as propriedades da curva de fadiga do material asfáltico utilizado, em paralelo com a estrutura do pavimento e o tráfego acumulado ao longo do tempo.

Tabela 1 – Variáveis independentes utilizadas na análise de irregularidade

Variável	Definição
<i>AT</i>	Área do pavimento com presença de trincas (%)
<i>AGE</i>	Idade do pavimento desde a sua construção ou reabilitação (meses)
<i>D_{MAX}</i>	Deflexão FWD abaixo do ponto de aplicação de carga (0,01 mm)
<i>FN</i>	<i>Flow Number</i> da mistura asfáltica empregada no trecho
<i>IRI_i</i>	Irregularidade inicial do pavimento após a construção ou reabilitação (m/km)
<i>N</i>	Número acumulado de repetições do eixo padrão (método USACE)
<i>N_A</i>	Número anual de repetições do eixo padrão (método USACE)

Fonte: Adaptado de Bueno *et al.* (2022)

Dentre as variáveis adotadas na Tabela 1, destaca-se que é corrente a utilização do parâmetro de tráfego calculado pelo método da AASHTO para avaliações funcionais de pavimentos asfálticos. Na presente pesquisa, optou-se por manter as premissas adotadas por Bueno *et al.* (2022), com utilização do método USACE para definição do tráfego (mais comumente utilizado em avaliações estruturais e definições de horizontes de projeto das estruturas de pavimentos). Essa ação justifica-se uma vez que o principal objetivo da elaboração de um modelo mecanístico-empírico de irregularidade é

a sua inserção na rotina de projeto do MeDiNa (que adota o tráfego calculado com o método USACE). Sendo assim, os autores entendem que a utilização de um novo padrão de tráfego nessa ferramenta causaria confusão nos usuários durante a fase de projeto/avaliação das estruturas. Então, optou-se por manter a modelagem da irregularidade com referência no tráfego calculado pelo método USACE.

Feito isso, os autores realizaram tentativas de adequação das variáveis aos resultados de irregularidade, utilizando apenas a base de dados empírica, determinada em campo nos trechos

monitorados, ao decorrer dos anos de acompanhamento.

No trabalho dos autores, as tentativas de adequar o caráter mecanicista aos modelos de previsão foram realizadas mediante utilização dos danos médios limitados acumulados, calculados com o LVECD (*Layered Viscoelastic Analysis for Critical Distresses*), desenvolvido na *North Carolina State University*. No presente estudo, será feita uma tentativa de adequar a rotina mecanicista dentro dos parâmetros mecânicos adotados pelo MeDiNa.

Visando identificar os parâmetros mais significativos no desempenho da estrutura de pavimento frente à irregularidade longitudinal, os autores utilizaram o método de Análise de Variância (ANOVA), que busca verificar se determinado fator é responsável pelas variações nas respostas das variáveis dependentes de interesse.

Nos testes ANOVA, busca-se obter o valor do teste F de Snedcor ($F_{\text{OBSERVADO}}$), determinado pela relação entre a variância entre grupos e dentro de um determinado grupo. A determinação da significância dos fatores avaliados é realizada mediante comparação de $F_{\text{OBSERVADO}}$ com um valor limite de F ($F_{\text{CRÍTICO}}$), encontrado em tabelas estatísticas de acordo com o nível de significância adotado, graus de liberdade, número de grupos (soma das variáveis dependentes e

independentes) e observações (Field, 2005).

Adicionalmente, as análises estatísticas que adotam a metodologia ANOVA também permitem avaliar o “valor P”, denominado como “nível descritivo de teste” ou “probabilidade de significância”. Em estudos como este, em que o nível de confiabilidade adotado foi de 95 %, se o “valor P” for maior ou igual ao nível de significância (5 %, ou seja, $\alpha = 0,05$), entende-se que não é possível concluir a ocorrência de uma associação estatisticamente significativa entre os parâmetros avaliados.

Assim, por meio do teste ANOVA, foi possível verificar se as variáveis independentes, determinadas em paralelo com a irregularidade, causam variações relevantes na resposta da variável dependente de interesse (IRI).

A Tabela 2 exibe o resumo dos resultados da Análise de Variância para o nível de significância de 5 % (confiabilidade = 95 %), classificando em ordem decrescente as variáveis independentes mais significativas no resultado da variável de resposta. A opção por trabalhar com intervalos estabelecidos no nível de confiança de 95 % foi efetuada com base nas recomendações de Zar (1984), Field (2005) e Kasznar (2007), que apresentam algumas orientações sobre a realização de regressões e testes ANOVA para avaliar associações entre variáveis.

Tabela 2 – Resumo da ANOVA para o planejamento fatorial do IRI

Variável	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	$F_{\text{OBSERVADO}}$	$F_{\text{CRÍTICO}}$	Valor P
IRI_i	4	75,72	18,93	115,68	2,42	4,01E-49
N	4	1,78E+15	4,45E+14	18,03	2,42	1,64E-12
N_A	4	1,56E+13	3,89E+12	13,53	2,42	1,09E-09
AT	4	31.081,06	7.770,26	10,99	2,42	5,20E-08
AGE	4	44.658,80	11.164,70	10,65	2,42	8,70E-08
$DMAX$	4	6.805,34	1.701,33	7,37	2,42	1,58E-05
FN	4	939.080,38	234.770,10	0,72	2,42	5,77E-01

Fonte: Adaptado de Bueno *et al.* (2022)

Pela análise da Tabela 2, é possível verificar que, destacadamente, o valor de irregularidade inicial, medido após o final do processo construtivo (IRI_i), é o fator que mais se associa à evolução da irregularidade longitudinal ao longo do tempo. Em um segundo grupo, percebe-se os efeitos do tráfego, além dos percentuais de área trincada na superfície (AT), a idade de operação do pavimento (AGE) e as deflexões máximas, medidas abaixo do ponto de aplicação de carga (D_{MÁX}).

Cabe aqui um comentário sobre a importância da irregularidade obtida após o final do processo construtivo na evolução dos indicadores funcionais. Em *softwares* de dimensionamento de pavimentos novos e restaurações, entende-se que o IRI inicial poderia ser definido como um critério a ser atingido conforme o tipo de rodovia que se está projetando; ou seja, quanto menos importante a via em termos de capacidade operacional e suporte estrutural, maior pode ser a irregularidade inicial obtida após o final da fase construtiva, e assim sucessivamente. Em tempo, deve-se mencionar a necessidade de uma discussão profunda acerca dos parâmetros limítrofes de irregularidade para a aceitação da execução de concretos asfálticos no Brasil.

Mediante análise dos resultados estatísticos da ANOVA realizada pelos autores, observa-se que o valor do teste F de Snedcor (F_{OBSERVADO}) foi maior que o valor limite de F (F_{CRÍTICO}) em todas as ocasiões analisadas, exceto para o parâmetro *Flow Number*, indicando a ocorrência de uma associação estatisticamente significativa entre os parâmetros avaliados, salvo o caso supracitado (FN da mistura asfáltica).

Sendo assim, para os casos avaliados por Bueno *et al.* (2022), a Análise de Variância indica que não há uma associação significativa entre os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida e

o seu parâmetro *Flow Number* com os valores de irregularidade longitudinal medidos em pista com o perfilômetro inercial. Neste trabalho, será repetida essa avaliação com o novo montante de informações geradas, com o intuito de inserir um parâmetro de deformação permanente da mistura asfáltica na rotina de previsão do IRI (ainda a definir em etapas futuras do trabalho).

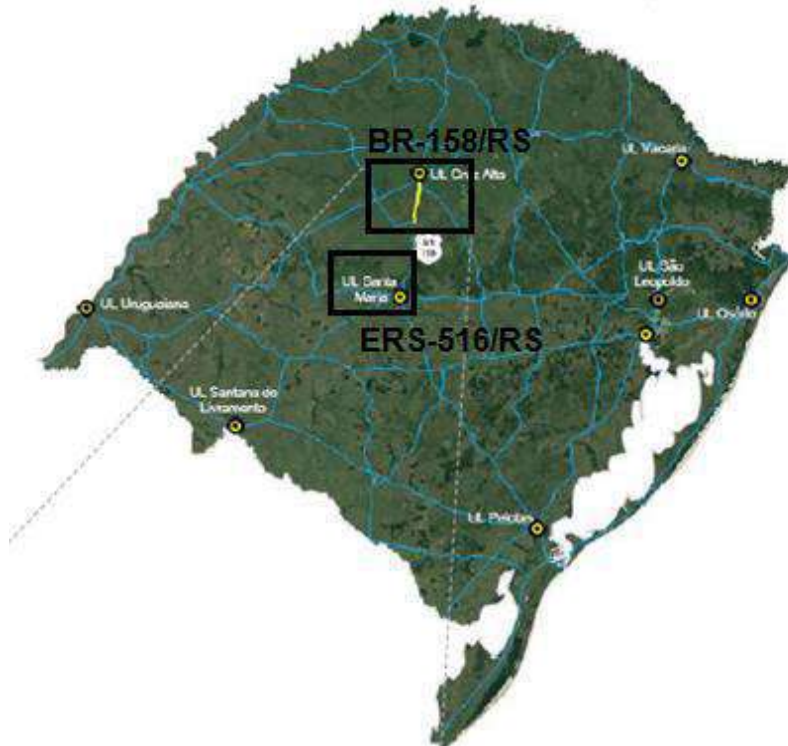
3.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Para as etapas futuras de desenvolvimento deste trabalho, pretende-se incorporar novos segmentos experimentais ao banco de dados compilado por Bueno *et al.* (2022). Para isso, conta-se com a colaboração da iniciativa representada pelo Guia para Execução de Segmentos Experimentais – PRO-MeDiNa (DNIT, 2023), cujo objetivo é incentivar e orientar a implantação e monitoramento de novos trechos, visando avaliar o comportamento de variadas alternativas de pavimentos e o aperfeiçoamento da calibração do sistema MeDiNa. Buscando padronizar os segmentos experimentais a serem construídos, o referido Guia estabelece os passos a serem realizados, tanto nas etapas de planejamento e de execução, quanto na etapa de monitoramento do pavimento ao longo de sua vida útil.

Dentro do escopo das atividades do TED nº 545/2022, firmado entre a UFSM e o DNIT, pretende-se incorporar, no mínimo, cinco novos segmentos experimentais ao banco de dados de irregularidade longitudinal, no que tange ao interesse deste trabalho. Quatro segmentos experimentais já estão em operação desde o final do ano de 2022. Dois deles encontram-se na BR-158/RS, nas proximidades do município de Cruz Alta/RS, entre o km 211+060 e km 211+360. Outros dois estão localizados nas proximidades do município de São Martinho da Serra/RS, na ERS-516/RS, entre o km 005+220 e km 005+550.

A Figura 1 destaca a localização geográfica aproximada dos trechos experimentais dentro do estado do Rio Grande do Sul. Já a Figura 2 exibe a realização dos levantamentos de campo nos segmentos, logo após a liberação ao tráfego.

Figura 1 – Localização dos segmentos experimentais na BR-158/RS e ERS-516/RS, dentro do estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptado de DNIT (2020)

Figura 2 – Levantamentos de campo nos segmentos experimentais após a liberação ao tráfego: (a) BR-158/RS e (b) ERS-516/RS



Fonte: Elaboração própria

Destaca-se, ainda, que o banco de dados do IPR/DNIT já tem mais 12 (doze) trechos no RS a serem incorporados ao banco de dados de irregularidade; totalizando, até o presente momento, 16 (dezesseis) segmentos adicionais. Com esses novos segmentos experimentais,

pretende-se aumentar as condições de contorno do modelo de previsão empírico de irregularidade longitudinal exposto por Bueno *et al.* (2022) e, posteriormente, incorporar a rotina mecânica na previsão de irregularidade, atrelada às condições atuais de dimensionamento de

pavimentos com uso do sistema MeDiNa. Destaca-se também que, devido às características continentais do território brasileiro, uma maior abrangência de segmentos em localidades distintas àquelas expostas neste trabalho e por Bueno *et al.* (2022) seriam interessantes para ampliar ainda mais as condições de contorno do modelo de irregularidade. Sendo assim, os autores incentivam que estudos futuros com metodologias análogas a este trabalho direcionem esforços para ampliar a base de dados no território brasileiro.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esforços conjuntos exemplificados pelos trabalhos de Franco (2007), Nascimento (2008), Guimarães (2009), Nascimento (2015) e Fritzen (2016) já trouxeram evoluções significativas para a modelagem dos principais mecanismos de ruptura do sistema MeDiNa: deformação permanente e trincamento por fadiga. Todavia, entende-se haver uma lacuna na previsão do comportamento funcional do sistema, atrelado à evolução da irregularidade longitudinal, tal como ocorre em *softwares* internacionais de dimensionamento de pavimentos, como, por exemplo, o *AASHTO Ware Pavement ME Design*.

Entende-se que, com base nos resultados gerados nas etapas futuras do presente estudo, em adição àqueles já obtidos por Bueno (2019) e Bueno *et al.* (2022), será possível prever, dentro

da rotina de avaliação do sistema MeDiNa, o desempenho funcional da estrutura do pavimento avaliado ao longo do tempo, empregado em associação a um indicador de qualidade construtiva.

Essa ação abre possibilidades importantes quando se trata do uso da plataforma de dimensionamento, uma vez que os resultados gerados, em caráter funcional, podem ter suas interpretações transferidas para análises econômicas. Sabe-se que a irregularidade longitudinal tem impacto relevante nos custos operacionais de usuários de rodovias, possibilitando definir argumentos para criação de sanções de bonificação e penalização aos responsáveis pela administração das respectivas rodovias, utilizando como critério um indicador que impacta diretamente o usuário.

Ainda, a melhoria na previsão de desempenho atrelada à maior abrangência dos métodos de dimensionamento segue uma tendência mundial de investir em critérios mais rigorosos para a seleção de materiais, dosagem e dimensionamento de estruturas de pavimentos.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IPR/DNIT, ANP/PETROBRAS e Pavesys Engenharia S/S Ltda. pelo apoio às pesquisas realizadas no âmbito do Termo de Execução Descentralizada nº 545/2020, celebrado entre a UFSM e o DNIT.

REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, N; EL-HAKIM, R, T, A; EL-BADAWY, S. M; AFIFY, H. A. International Roughness Index prediction model for flexible pavements. **International Journal of Pavement Engineering**. Taylor & Francis Online, Reino Unido, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E1215/93: Standard Specification for Trailers Used for Measuring Vehicular Response to Road Roughness**. West Conshohocken (EUA), 1993.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E1926/08: Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements**. West Conshohocken (EUA), 2008.

BENNETT, C. R; PATERSON, W. D. O. **A Guide to Calibration and Adaptation (Highway Development and Management - HDM-4)**. 297 p. Highway Development and Management Series, versão 1.0, v.5. Birmingham (Reino Unido), 2000.

BHATTACHARJEE, S. **Imperfect Preventive Maintenance Strategy for Flexible Pavements Based on Threshold Reliability, Cost Optimization and Mechanistic Empirical Analysis**. 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington (EUA), 2016.

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.

BUENO, L. D.; PEREIRA, D. S.; SPECHT, L. 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. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2029758>, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 159/85. Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos**. Rio de Janeiro/RJ, 1985.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Anteprojeto de engenharia para restauração da BR-158/RS**. Volume 01 - Relatório de Projeto. Superintendência Regional do DNIT no Estado do Rio Grande Do Sul. Cruz Alta/RS, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria-Geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas em Transportes. **Publicação IPR-749: Guia para Execução de Segmentos Experimentais – PRO-MeDiNa**. 2ª Edição. Brasília, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Instrução de serviço – IS-247: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 22 p. Brasília, 2021.

FIELD, A. **Discovering statistics using IBM SPSS**. (2nd ed.). London: Sage. Sandra C. Duhé. University of Louisiana, Lafayette (EUA), 2005.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 315 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2007.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método Mecanístico – Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos. Relatório Parcial IV (A)**. Projeto DNIT TED nº 682/2014. Processo nº 50607.002043/2013-00. Convênio UFRJ-DNIT, Rio de Janeiro/RJ, 2018.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método Mecanístico – Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos. Manual de Utilização do Programa MeDiNa**. Projeto DNIT TED nº 682/2014. Processo nº 50607.002043/2013-00. Convênio UFRJ-DNIT, Rio de Janeiro/RJ, 2020.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos**. 286 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2016.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 367 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2009.

KASZNAR, I. K. **Regressão Múltipla: Uma digressão sobre seus usos**. IBCI, Rio de Janeiro/RJ, 2007.

KERALI, H. R. **The role of HDM-4 in Road Management**. Inn: First Road Transportation Technology Transfer Conference in Africa. p. 320 – 333. Tanzania, 2001.

NAKAHARA, S. M. **Estudo do Desempenho de Reforços de Pavimentos Asfálticos em Via Urbana sujeita a Tráfego Comercial Pesado**. 312 p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2005.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. 204p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2008.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil**. 335 p. Tese de Doutorado. North Carolina State University. North Carolina (EUA), 2015.

ODOKI, J. B.; KERALI, H. G. R. **Analytical framework and model descriptions (Highway Development and Management - HDM-4)**. 1184 p. Highway Development and Management Series, versão 1.0, v.4. Birmingham (Reino Unido), 2000.

PATERSON, W. D. O. **Road Deterioration and Maintenance Effects - Models for Planning and Management**. 472 p. World Bank. Washington (EUA), 1987.

PAVI, D. R. **Identificação de fatores construtivos que contribuem para o aumento da irregularidade longitudinal a partir do monitoramento de implantação e restauração de trechos rodoviários**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2019.

QUEIROZ, C. A. V. **Modelos de Previsão do Desempenho para Gerência de Pavimentos no Brasil** – GEIPOT, Brasília/DF, 1984.

QUEIROZ, C. A. V. **Performance prediction models for pavement management in Brazil**. 317 p. Tese de Doutorado. Faculty of the Graduate School of the University of Texas, Austin (EUA), 1981.

SCHERER, R. G. **Influência da irregularidade longitudinal de pavimentos na perda de carga no transporte de soja e nos demais custos operacionais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2022.

SONCIM, S. P. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos com base em dados da rede de rodovias do Estado da Bahia**. 241 p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2011.

WATANATADA, T; HARRAL, C. G; PATERSON, W. D. O; DHARESHWAR, A. M; BHANDARI, A; TSUNOKAWA, K. **The Highway Design and Maintenance Standards Model** – Vol1: Description of the HDM-3 Model. 290 p. Washington (EUA), 1987.

YSHIBA, J. K. **Modelo de Desempenho de Pavimentos: Estudo de Rodovias do Estado do Paraná**. 340 p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2003.

ZAR, J. H. **Biostatistical Analysis**. Prentice Hall International. New Jersey (EUA), 1984.

ESTUDO PRELIMINAR PARA DOSAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO UTILIZANDO MATERIAIS FRESADOS DE DIFERENTES ORIGENS E IDADES

PRELIMINARY STUDY TO MIX RECYCLED ASPHALT CONCRETE USING MILLED MATERIALS FROM DIFFERENT SOURCES AND AGES

Jamille Freitas Fiuza - fiuzajf@outlook.com - <https://orcid.org/0000-0001-5107-8463>

Mario Sergio de Souza Almeida - mario.almeida@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0000-0002-0222-4804>

Weiner Gustavo Silva Costa - weiner@ufpb.edu.br - <https://orcid.org/0000-0001-6151-8805>

Elane Donato Santos - elanedonato@aluno.ufpb.edu.br - <https://orcid.org/0009-0007-3409-7102>

Paulo Ricardo Lemos de Santana - ricardolemos@aluno.ufpb.edu.br - <https://orcid.org/0009-0000-7713-905X>

RESUMO: A fresagem é uma das técnicas mais utilizadas para manutenção e restauração de pavimentos asfálticos no Brasil. A aplicação dessa técnica gera volumes consideráveis de resíduos do revestimento antigo, conhecido como material fresado ou RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), constituído, basicamente, de agregados diversos e ligante asfáltico envelhecido. Este trabalho é um estudo preliminar que avaliou a influência da idade de materiais fresados oriundos de três diferentes rodovias do Estado da Bahia, no comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente produzidas em laboratório e dosadas com elevado percentual de RAP. Após a extração do ligante asfáltico foram realizados ensaios de granulometria do agregado obtido para determinação da curva granulométrica de cada RAP. Seguindo o método de dosagem Marshall, adicionou-se ao RAP agregados virgens e teores crescentes de CAP convencional para moldagem de corpos de prova para determinação da volumetria da mistura, além da estabilidade e fluência. Os resultados indicaram haver influência da idade do RAP na demanda por ligante asfáltico novo na dosagem da mistura reciclada.

PALAVRAS-CHAVE: RAP; sustentabilidade; envelhecimento do CAP.

ABSTRACT: *Milling is one of the most widely used techniques for asphalt sidewalk maintenance and restoration in Brazil. The application of this technique generates considerable volumes of waste from the old coating, known as milled material or RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), consisting basically of various aggregates and aged asphalt binder. This paper is a preliminary study that evaluated the influence of the age of milled material from three different highways in the state of Bahia, in the mechanical behavior of hot recycled asphalt mixtures produced in the laboratory and dosed with a high percentage of RAP. After extraction of the asphalt binder, aggregate granulometry tests were performed to determine the granulometric curve of each RAP. Following the Marshall dosage method, virgin aggregates and increasing levels of conventional PAC were added to the RAP to mold test specimens to determine the volumetry of the mixture, as well as stability and creep. The results indicated that the age of the RAP influences the demand for new asphalt binder in the dosage of the recycled mixture.*

KEYWORDS: RAP; sustainability; CAP aging.

1 INTRODUÇÃO

A crescente prática na Engenharia rodoviária no uso de técnicas alternativas (ALMEIDA-COSTA e BENTA, 2016; RAPOSEIRAS *et al.*, 2017) e aproveitamento de resíduos diversos em obras de pavimentação, com destaque para borracha de pneus e resíduo de construção e demolição (RCD), vem tendo reflexos ambientais e econômicos em diferentes países (IZAKS *et al.*, 2015; XIE *et al.*, 2017; UNGER FILHO *et al.*, 2020). Entretanto, o material fresado do revestimento asfáltico da própria via, conhecido como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), se destaca como o RCD mais utilizado nas obras que optam pelo uso da reciclagem (SEGUNDO *et al.*, 2016, LIZÁRRAGA *et al.*, 2018). No Brasil, em especial, com aproximadamente 213,5 mil km pavimentados, dos quais 99% possuem revestimento asfáltico (CNT, 2022), minerar agregados e ligantes asfálticos envelhecidos em obras de restauração para aproveitamento em misturas asfálticas recicladas vem se tornando uma rotina, principalmente em rodovias concessionadas. De acordo com o manual de restauração de pavimentos asfálticos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006c), a economia de energia gerada pelo uso da reciclagem de pavimentos asfálticos pode variar entre 16%, quando a mistura é produzida em usina, até 65%, quando a reciclagem é realizada na própria pista.

O aumento do custo do ligante asfáltico nos últimos anos também tem fomentado a utilização de RAP na produção de misturas asfálticas recicladas, aliado ao fato de ser uma alternativa ecológica por reduzir a necessidade de materiais virgens (IZAKS *et al.*, 2015). Nessa linha, Moghaddam e Baaj (2016) destacam que os benefícios relacionados a reutilização de agregados e ligantes asfálticos disponíveis no

RAP contribuem para redução significativa no custo de construção do pavimento, atrelado a diferentes benefícios ambientais. Neste cenário, vários estudos ao redor do mundo procuram viabilizar a utilização do RAP em misturas asfálticas quentes, mornas e frias. Izaks *et al.* (2015) projetaram três misturas formadas pela combinação de RAP de duas diferentes origens e agregados locais para rodovias de média e alta intensidade de tráfego. A análise do ligante do RAP mostrou envelhecimento significativo, com penetração em torno de 38 (0,1 mm) e ponto de amolecimento de 56 °C. Foram projetadas misturas contendo 30% e 50% de RAP de cada origem sem uso de agente rejuvenescedor. Foi adicionado, entretanto, um ligante mais macio, caracterizado pela penetração de 70 (0,1 mm), ao invés de um ligante tradicionalmente utilizado na Estônia, cuja penetração se enquadraria no centro da faixa entre 50 e 70 (0,1 mm), para compensar a rigidez provocada pelo envelhecimento do ligante do RAP e, assim, melhorar a qualidade do ligante asfáltico resultante da mistura (velho + novo). Os resultados de ensaios com simulador de tráfego de laboratório HWTD (Hamburg Wheel Tracking Device) demonstraram que todas as misturas recicladas testadas apresentaram alta resistência à deformação permanente (DP) e os resultados dos testes de fadiga usando viga de flexão de quatro pontos foram semelhantes aos observados na mistura tradicional. Estes resultados demonstraram que as misturas recicladas com alto teor de RAP podem ser projetadas com sucesso para atender aos requisitos volumétricos e de desempenho compatíveis com as misturas convencionais.

Lizárraga *et al.* (2018) desenvolveram estudos de laboratório e campo voltados para utilização de elevados teores de RAP (70% e

100%) na dosagem de misturas asfálticas mornas para aplicação em vias urbanas. O RAP foi inicialmente caracterizado para dosagem e, posteriormente, as misturas foram produzidas em uma usina protótipo a uma temperatura de mistura abaixo de 100 °C, com uso de aditivo. Em seguida, para comparar seu desempenho mecânico, seções testes foram construídas com a mistura reciclada morna produzida e com uma mistura a quente convencional. Após um ano da construção das seções testes foram coletadas amostras para avaliação do comportamento mecânico das misturas. Os resultados mostraram que o desempenho das misturas mornas pode ser comparado com o das misturas convencionais a quente em termos de resistência à fadiga e resistência a deformação permanente.

Bolina da Cunha *et al.* (2018) avaliaram o comportamento mecânico de misturas usinadas a quente contendo 50% e 100% de RAP e adição de diferentes teores de cimento asfáltico de petróleo (CAP) novo, entre 2,5% e 4,5%. O RAP utilizado foi proveniente da rodovia BR-290, situada no trecho entre os municípios de Rosário do Sul e São Gabriel, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A caracterização do material fresado

foi realizada através de ensaios de granulometria, extração de ligante, estabilidade e fluência Marshall e resistência à tração por compressão diametral, em corpos de prova cilíndricos compactados de acordo com a metodologia Marshall. Os resultados obtidos demonstraram valores de estabilidade, fluência e resistência à tração por compressão diametral satisfatórios para a aplicação das misturas asfálticas testadas para uso em camadas de rolamento.

Na utilização dessas misturas, entretanto, um ponto importante a se destacar é a importância da origem e idade do RAP na demanda da mistura asfáltica reciclada pela adição de ligante asfáltico novo, ou mesmo agente de reciclagem que proporcione melhorias nas características de consistência do ligante envelhecido presente no material fresado. Gaspar *et al.* (2020) destacam o desafio de produzir misturas asfálticas recicladas com maior conteúdo RAP sem comprometer o desempenho da mistura no campo. Na reciclagem a quente e morna, segundo os autores, o ligante do RAP é ativado, mas a quantidade que realmente interage com o ligante novo é ainda desconhecida (Figura 1).

Figura 1 – Três cenários possíveis de misturas entre os ligantes asfálticos (novo e envelhecido)



Fonte: Adaptado de Gaspar *et al.* (2020)

Suzuki *et al.* (2023) desenvolveram um estudo para avaliação do efeito de diferentes teores de material fresado na dosagem e

comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas à quente, para aplicação de revestimento de pavimento. Inicialmente, foram

avaliadas em laboratório misturas recicladas contendo baixos teores (10%, 20%, 25%) e altos teores (35%, 50% e 65%) de RAP, sem adição de agente rejuvenescedor (AR). Numa segunda etapa foram avaliadas misturas contendo 25% e 50% de RAP, com uso de AR de base vegetal. Os resultados indicaram que as misturas contendo altos teores de RAP apresentaram melhor resistência à deformação permanente e comportamento satisfatório em relação à fadiga. Os autores observaram ainda que o uso de AR melhorou o comportamento das misturas testadas quanto à fadiga.

Nessa perspectiva, o objetivo do presente estudo é avaliar preliminarmente a influência da idade de diferentes tipos de material fresado, oriundos de rodovias do estado da Bahia, no teor de projeto de misturas asfálticas recicladas, dosadas em laboratório, com elevados percentuais de RAP.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental teve início com a coleta do material fresado (RAP) em cada uma das rodovias do estado da Bahia contempladas no presente estudo, sendo duas delas rodovias Federais, BR-324 (km 540) e BR-101 (km 505,6), além da rodovia estadual BA-093 (km 37). As amostras foram levadas para o Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), onde deu-se início aos ensaios de caracterização.

Os revestimentos das rodovias BR-324 e a BA-093, usinados à quente, do tipo concreto asfáltico (CA), quando coletados, apresentavam cerca de 10 anos pós execução, com espessura média de corte na operação de fresagem de 5,0 cm. Na BR-101, o revestimento, também em CA, havia sido executado há cerca de dois anos. O motivo para a fresagem precoce no segmento onde coletou-se a amostra foi justificado pela

ocorrência de trilhas de roda e exudação excessivas, devido a instalação de ondulação transversal (“quebra molas”) no local, as quais estavam comprometendo a trafegabilidade e, por isso, a espessura fresada para regularização foi da ordem de 2,0 cm. A pequena espessura fresada na BR-101, aliada a ocorrência de exudação no local, justificam o elevado teor de CAP presente neste RAP, conforme será observado mais adiante (Tabela 2).

Para confecção dos projetos das misturas asfálticas recicladas, sem uso de agente rejuvenescedor, foram adquiridos 50 kg de brita 5/8” e 50 kg de brita 3/4”, ambas da pedra Pedra do Cavalo, situada no município de Muritiba/BA, além de 20 litros de CAP 50/70, cedidos pela Empresa Brasquímica Produtos Asfálticos Ltda.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FRESADOS E AGREGADOS VIRGENS

As amostras de RAP foram coletadas imediatamente após os serviços de fresagem à frio, armazenados em sacos de 50 kg (cerca de 100 kg por rodovia) e transportados para o laboratório. No processo de quarteamento percebeu-se a presença de grumos no material fresado, sendo que na BR-324 a presença foi mais acentuada. As amostras de RAP foram quarteadas utilizando-se o quarteador de abertura 3/4”, sendo que o material passante foi o utilizado no presente estudo. No presente estudo, executado no ano de 2016, os materiais fresados foram caracterizados com base na ES DNIT 33 (DNIT, 2005), contemplando a extração do ligante asfáltico residual, via Rotarex, método de ensaio ME DNER 53 (DNER, 1994b), análise granulométrica do agregado oriundo da extração, ME DNER 83 (DNER, 1998b), densidade real e absorção do agregado gráudo, ME DNER 81 (DNER, 1998a) e densidade real do agregado

miúdo, ME DNER 84 (DNER, 1998c). Na Tabela 1 são apresentados os teores de CAP extração com o Rotarex de cada amostra de RAP. determinados e nas Tabelas 2 e 3 as

Tabela 1 – Teores de CAP dos materiais fresados

Método de ensaio	Teor de CAP BR-324/BA (%)	Teor de CAP BA-093/BA (%)	Teor de CAP BR-101/BA (%)
(ME) DNER 53 Rotarex	5,53	5,65	7,57

Fonte: Elaboração própria

Os agregados virgens adquiridos para comporem os projetos das misturas junto com o RAP, foram submetidos aos ensaios de análise granulométrica, ME DNER 83 (DNER, 1998b), além de densidade e absorção, ME DNER 81 (DNER, 1998a). As granulometrias dos dois agregados virgens também estão apresentadas na Tabela 2 e suas demais características, como densidade aparente (D_{ap}), densidade real (D_{real}), absorção (Abs) e abrasão Los Angeles (Abrasão LA), encontram-se na Tabela 3.

Tabela 2 – Granulometrias dos agregados do fresado e agregados virgens

Peneiras		BR-324	BA-093	BR-101	Brita 5/8"	Brita 3/4"
Nome	Abertura (mm)	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante
2"	50,8	100	100	100	100	100
1 1/2"	38,1	100	100	100	100	100
1"	25,4	100	100	100	100	100
3/4"	19,1	100	100	100	100	99,80
1/2"	12,7	97,15	97,07	98,84	71,28	10,64
3/8"	9,5	92,75	93,63	97,21	33,65	3,29
#4	4,8	75,14	73,56	80,74	0,93	1,20
#10	2,0	54,93	55,92	61,17	0,67	0,94
#40	0,42	29,03	31,59	34,61	0,62	0,74
#80	0,175	16,70	19,10	23,44	0,59	0,60
#200	0,075	8,79	10,08	13,67	0,50	0,44

Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 – Caracterização dos agregados

Ensaio	BR-324		BA-093		BR-101		Brita 5/8"	Brita 3/4"
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
D_{ap} (g/cm ³)	2,73	-	2,74	-	2,62	-	2,76	2,76
D_{real} (g/cm ³)	2,79	2,73	2,78	2,75	2,67	2,71	2,79	2,79
Abs (%)	0,80	-	0,76	-	0,58	-	0,38	0,43
Abrasão LA	-	-	-	-	-	-	16,70	17,04

Fonte: Elaboração própria

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO CAP NOVO

O CAP 50/70 novo foi caracterizado por meio dos ensaios de Penetração, ME DNIT 155 (DNIT,

2010b), Viscosidade Saybolt-Furol, ME DNER 4 (DNER, 1994a), Ponto de Fulgor, ME DNER 148 (DNER, 1994d), e ponto de amolecimento, ME

DNIT 131 (DNIT, 2010a). A densidade do CAP 50/70 foi considerada igual a 1,03 g/cm³, conforme caracterização encaminhada pelo fornecedor do ligante. Os dados de caracterização do ligante asfáltico utilizados nos projetos das misturas estão apresentados, de acordo com a especificação de material EM DNIT 95 (DNIT 2006b), na Tabela 4. Com os dados de viscosidade obtidos nas temperaturas de 135 °C, 150 °C e 177 °C e atendendo os limites de viscosidade estabelecidos pelo ME DNER 43 (DNER, 1995), foram determinadas as temperaturas para a mistura e compactação do concreto asfáltico reciclado (Figura 2). A faixa de

temperatura do CAP novo para preparação de cada mistura variou entre 149,9 °C e 156,5 °C, enquanto para compactação a temperatura ficou compreendida entre 131,6 °C e 140,4 °C.

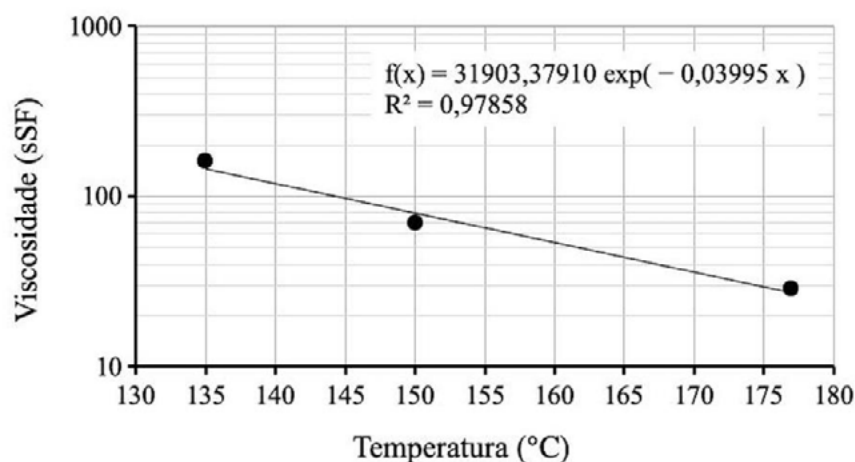
Cabe reiterar que não foi utilizado agente rejuvenescedor no presente estudo, motivo pelo qual escolheu-se o CAP 50/70 novo de um lote que apresentou a menor consistência possível, da mesma forma que Izaks *et al.* (2015), conforme os valores medidos de penetração, viscosidade e ponto de amolecimento, com destaque para este último que, conforme a Tabela 4, ficou abaixo do valor mínimo estabelecido na especificação EM DNIT 95 (DNIT, 2006b).

Tabela 4 – Caracterização do CAP novo (Araújo *et al.*, 2021)

ENSIAO	ESPECIFICAÇÃO DNIT-EM 95/2006	RESULTADO	MÉTODO DE ENSAIO
Penetração a 25 °C (0,1 mm)	50 - 70	70	DNIT-ME 155/2010
Viscosidade Saybolt-Furol (s)	135 °C	Min. 141	DNER-ME 4/1994
	150 °C	Min. 50	
	177 °C	30 - 150	
Ponto de Fulgor (°C)	Min. 235	335	DNER-ME 148/1994
Ponto de amolecimento (°C)	Min. 46	39,5	DNIT-ME 131/2010

Fonte: Elaboração própria

Figura 2 – Curva viscosidade x temperatura do CAP novo



Fonte: Elaboração própria

2.3 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

O manual de restauração de pavimentos asfálticos (DNIT, 2006c) estabelece que na dosagem da mistura reciclada a quente, quando for necessária uma correção granulométrica do RAP, deverá ser determinada a quantidade e qualidade dos agregados ou da mistura a ser adicionada, de maneira a satisfazer da melhor forma a faixa granulométrica específica adotada. Simultaneamente, deverá ser analisada a necessidade de utilização do CAP adicional.

Dessa forma, conhecendo-se a curva granulométrica dos agregados de cada RAP e dos agregados virgens (Tabela 2), definiu-se de forma interativa as porcentagens, em massa, de cada material para a dosagem das misturas recicladas. O critério utilizado para tal estabeleceu que o

acréscimo dos agregados fosse realizado de forma que houvesse o melhor enquadramento possível na faixa C da especificação de Serviço ES DNIT 33 (DNIT, 2005), com o maior teor possível de fresado. As quantidades de brita 5/8", brita 3/4" e RAP que melhor se ajustaram em cada dosagem, estão apresentadas na Tabela 5. Como os percentuais de agregados virgens e RAP determinados servirão como ponto de partida para a dosagem das misturas recicladas, também estão apresentados na Tabela 5 os teores de CAP residual resultantes de cada uma destas composições, calculados com base nos valores de extração de ligante dos materiais fresados, apresentados na Tabela 1, e a participação de cada agregado virgem, para os três materiais fresados testados.

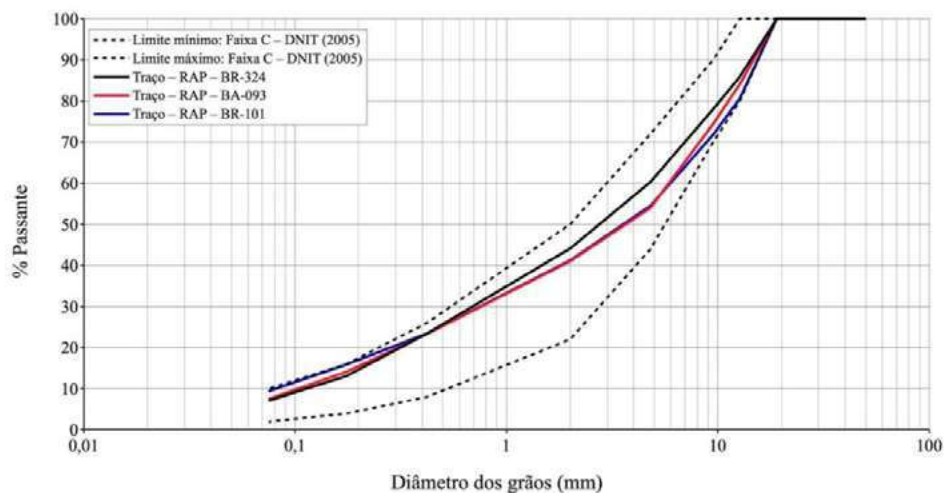
Tabela 5 – Granulometria das misturas asfálticas recicladas e CAP resultante

ORIGEM	BRITA 5/8" (%)	BRITA 3/4" (%)	RAP (%)	CAP RESULTANTE (%)
BR-324	10	10	80	4,47
BA-093	17	10	73	4,19
BR-101	18	15	67	5,20

Fonte: Elaboração própria

As granulometrias de cada projeto de mistura reciclada da Tabela 5, devidamente enquadradas nos limites estabelecidos pela faixa C da ES DNIT 33 (DNIT, 2005), estão reunidas na Figura 3

Figura 3 – Granulometrias das misturas recicladas



Fonte: Elaboração própria

Os teores de CAP utilizados nas dosagens das misturas recicladas (soma do CAP envelhecido do RAP e CAP 50/70 novo) variaram de acordo com as características de cada tipo de RAP. Inicialmente todos os traços receberam adição de CAP até o limite de 2,5%. Entretanto, com o objetivo de analisar o comportamento das misturas constituídas pelos materiais fresados mais antigos (BR-324 e BA-093), optou-se que para a mistura com o RAP da BR-324 a quantidade adicional de CAP novo seria maior, ficando próximo de 3%. Para cada traço foram moldados, de início, corpos de provas (CP) sem adição de CAP novo, ou seja, apenas com o teor de ligante residual originalmente presente em cada RAP (Tabela 5), para servir como uma espécie de balizador para avaliação das variações das propriedades mecânicas e volumétricas das amostras testadas com teores crescentes de CAP novo.

Na Tabela 6 encontra-se o detalhamento da quantidade dos materiais utilizados para confecção dos CP de 1200 g cada, para os diferentes teores de ligante asfáltico que foram testados, baseado nos traços determinados anteriormente (Tabela 5).

De acordo com o método de ensaio Marshall ME DNER 43 (DNER, 1995), para cada teor de ligante foram moldados três corpos de prova. O objetivo deste ensaio foi determinar o teor de CAP total de projeto que representasse o melhor comportamento quanto a resistência à compressão (estabilidade), fluência, volume de vazios (V_v) e relação betume/vazios (RBV), de forma a atender aos limites estabelecidos pela ES DNIT 33 (DNIT, 2005). Essa preparação resultou em 18 CP para a mistura com o RAP da BA-093, 18 CP para a a mistura com RAP da BR-101 e 24 CP para a mistura com RAP da BR-324.

Os materiais foram aquecidos, conforme temperaturas definidas pela curva de viscosidade elaborada (Figura 2). O RAP foi pré-aquecido em estufa a 120 °C para retirada dos grumos remanescentes e depois foi quarteado para obtenção da quantidade necessária para cada teor. Em seguida, o fresado foi aquecido na mesma faixa de temperatura definida para o CAP 50/70 novo (Figura 2) e os agregados virgens foram aquecidos a temperatura de 12,5 °C acima da temperatura do CAP, aproximadamente, conforme estabelece o método ME DNER 43 (DNER, 1995). Após atingirem as devidas temperaturas, cada material foi levado ao tachômetro de mistura, sendo que o CAP novo foi adicionado por último sobre os agregados e RAP. A temperatura final de cada mistura ficou por volta de 150 °C e a temperatura de compactação em torno de 138 °C. A compactação da mistura foi realizada com 75 golpes do soquete Marshall em cada face do corpo de prova.

Após a compactação os moldes foram colocados em uma superfície lisa e permaneceram em repouso por cerca de 14 horas para depois serem desmoldados. Após extração foram coletadas quatro medidas de altura dos CP em posições diametralmente opostas. Os CP foram pesados ao ar e posteriormente pesados imersos em um recipiente com água, conforme o ME DNER 117 (DNER, 1994c). Em seguida as amostras foram imersas em banho-maria a (60 ± 1 °C) por um período de 30 a 40 minutos. Por fim, um a um, os CP foram rompidos na prensa Marshall para determinação dos valores de estabilidade e fluência. O critério adotado para definição do teor de ligante de projeto considerou o menor teor entre aqueles que atenderam a todos os parâmetros volumétricos, de resistência e deformabilidade, preconizados pela ES DNIT 33 (DNIT, 2005) e analisados no presente estudo.

Tabela 6 – Detalhamento da dosagem das misturas reciclada testadas

ORIGEM DO RAP	BRITA 5/8"	BRITA 3/4"	RAP			CAP NOVO		CAP TOTAL
	(g)	(g)	Agregado (g)	CAP (g)	CAP (%)	(g)	(%)	(%)
BR-324	114,63	114,63	917,04	53,68	4,47	0,00	0,00	4,47
	114,24	114,24	914,29	53,53	4,46	3,59	0,30	4,76
	113,76	113,76	909,00	53,27	4,44	9,25	0,77	5,21
	113,21	113,21	905,66	53,01	4,42	14,91	1,24	5,66
	112,68	112,68	901,41	52,77	4,40	20,47	1,71	6,10
	112,15	112,15	897,20	52,51	4,38	25,99	2,17	6,54
	111,63	111,63	893,02	52,28	4,36	31,45	2,62	6,98
	111,11	111,11	888,89	52,03	4,34	36,86	3,07	7,41
BA-093	195,46	114,97	839,31	50,26	4,19	0,00	0,00	4,19
	194,29	114,29	834,29	49,96	4,16	7,18	0,60	4,76
	193,36	113,74	830,33	49,72	4,14	12,84	1,07	5,21
	192,45	113,21	826,42	49,49	4,12	18,44	1,54	5,66
	191,55	112,68	822,54	49,26	4,10	23,98	2,00	6,10
	190,65	112,15	818,69	49,03	4,09	29,48	2,46	6,54
BR-101	204,76	170,60	762,18	62,42	5,20	0,00	0,00	5,20
	203,77	169,81	758,49	62,12	5,18	5,80	0,48	5,66
	202,82	169,01	754,93	61,83	5,15	11,41	0,95	6,10
	201,87	168,22	751,40	61,54	5,13	16,96	1,41	6,54
	200,93	167,44	747,91	61,25	5,10	22,47	1,87	6,98
	200,00	166,67	744,44	60,97	5,08	27,92	2,33	7,41

Fonte: Elaboração própria

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DE CADA TRAÇO PROJETADO

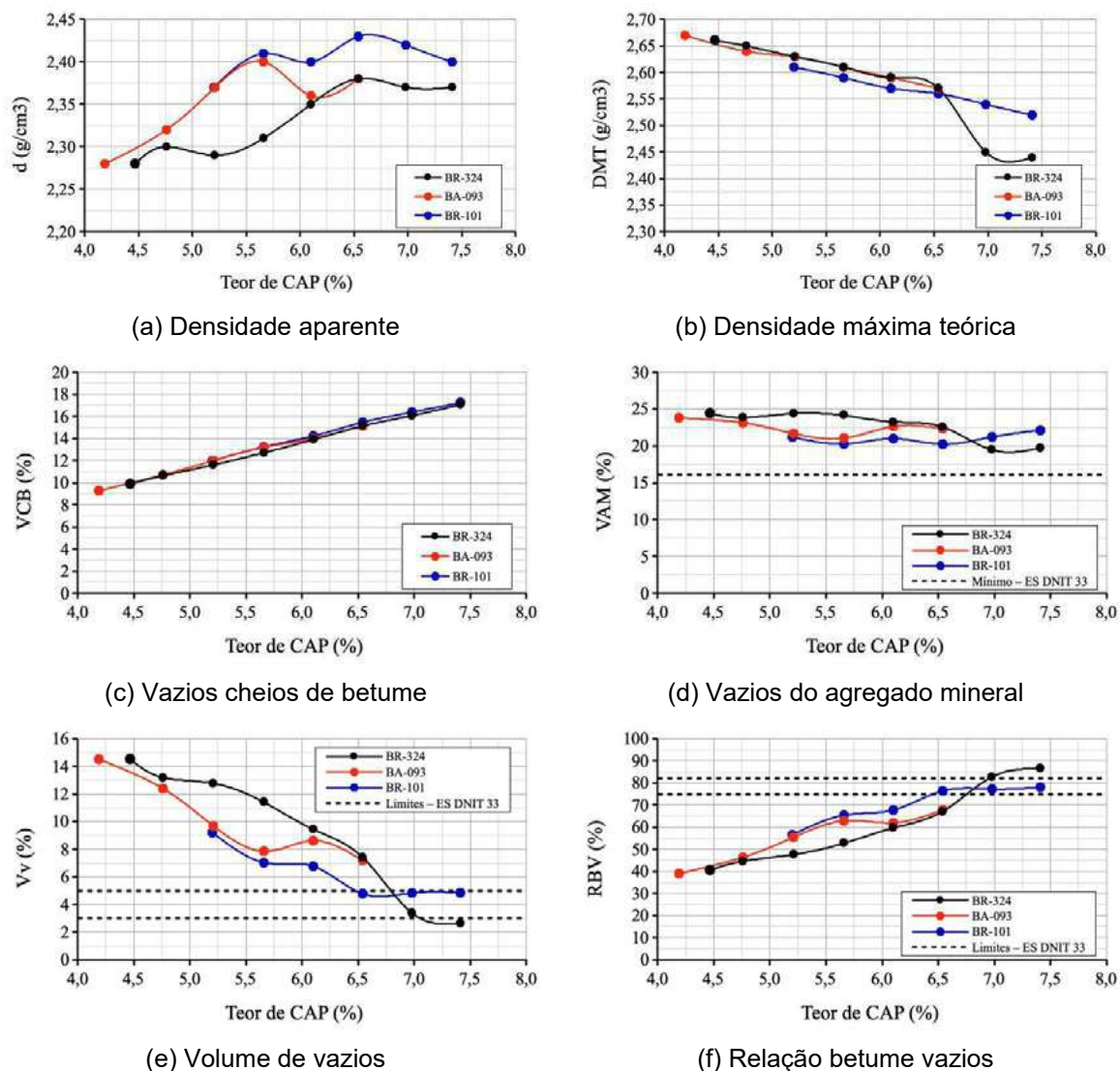
Para facilitar a análise dos dados da dosagem das misturas recicladas, apresenta-se na Figura 4 os resultados de densidade aparente (d), densidade máxima teórica (DMT), volume de vazios (Vv), vazios cheios de betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume vazios (RBV), referentes às misturas recicladas dosadas.

Os resultados da Figura 4 demonstram que os valores da densidade aparente das três misturas crescem com o aumento do teor de CAP total até o atingimento de seu valor máximo para os teores de 6,54%, 5,66% e 6,54%, para BR-324, BA-093 e BR-101, correspondendo a 2,17%, 1,54% e 1,41% de adição de CAP novo, respectivamente (Tabela 6).

Quanto a densidade máxima teórica (DMT) ocorre o inverso, ou seja, há uma queda contínua deste parâmetro com o aumento do teor de CAP, pois, por ser este o de menor densidade real entre

os materiais constituintes das misturas asfálticas, seu acréscimo implica na redução relativa dos demais componentes, culminando na redução da DMT. Em relação aos valores de VCB e VAM, calculados com base em cada mistura produzida para determinação do Vv e RBV, apresentam comportamentos distintos, sendo que enquanto o primeiro apresenta valores praticamente coincidentes para as três misturas testadas e cresce continuamente com o aumento do teor de CAP, o segundo apresenta diferenças entre as misturas e sua variação tende a pequena queda com aumento do teor de ligante. Finalmente, os resultados de Vv e RBV, que são fisicamente correlacionados, apresentam comportamentos previsivelmente antagônicos, onde Vv decresce com o aumento do teor de CAP e, consequentemente, RBV aumenta com o aumento da quantidade de ligante na mistura. Portanto, à medida que o teor de CAP foi aumentando nas misturas recicladas o Vv foi diminuindo e, consequentemente, o RBV foi crescendo.

Figura 4 – Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 4 (e) e (f) encontram-se sinalizados os limites de Vv e RBV estabelecidos pela ES DNIT 33 (DNIT, 2005), de 3% a 5% e 75% a 82%, respectivamente, para misturas recicladas a quente. Com base nisso, é possível verificar que a mistura com RAP da BR-324 somente apresentou resultado compatível de Vv para o teor de 6,98% de CAP total (adição de 2,62% de CAP novo). Entretanto, nesse teor o RBV foi de 82,77, ou seja, acima do limite máximo estabelecido. Contudo, a mesma norma define que caso o RBV não seja atingido, basta que a mistura atenda ao limite mínimo de VAM de 16%, sinalizado na Figura 4 (d), para que atenda a esse

critério. Para a mistura com RAP da BA-093, cujo resíduo é de mesma idade que o da BR-324, com os teores testados de CAP total e CAP novo adicionado, não foi possível atingir as exigências da referida norma para Vv, demonstrando, conforme comprovado com o RAP da BR-324, da necessidade de utilização de teores maiores de CAP novo na mistura.

Quanto a mistura com o RAP da BR-101, sendo este o mais novo dentre os três resíduos analisados, as exigências da ES DNIT 33 (DNIT, 2005) foram atendidas com menor percentual de CAP total (6,54%) e de CAP novo (1,44%). Vale destacar que nesse CAP total tem-se 5,10% de

ligante do RAP que quando comparado ao RAP da BR-324, esse teor é 17% maior. Mesmo considerando-se essa diferença, a demanda por CAP novo da mistura com o RAP da BR-324 é 31% maior, demonstrando haver relação entre a idade do RAP e a demanda por ligante novo para viabilizar a mistura com o ligante envelhecido. É interessante ainda observar que o comportamento das misturas recicladas com diferentes teores de CAP apresentou variação não linear dos parâmetros avaliados. Tal fato pode estar relacionado com o processo de interação entre o CAP residual do RAP com o CAP novo adicionado, descrita por GASPAR *et al.* (2020).

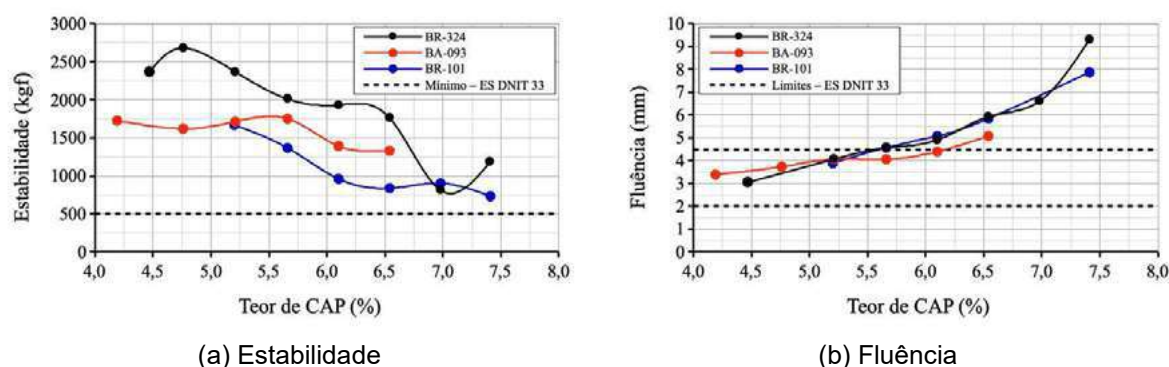
3.2 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL

Na Figura 5 são apresentados os resultados de estabilidade e fluência Marshall para os diferentes teores testados de CAP total das misturas recicladas. Os resultados de estabilidade demonstram uma maior rigidez para baixos teores de CAP das misturas com RAP mais antigos (BR-324 e BA-093), em comparação aos resultados da mistura com o RAP da BR-101, o mais novo entre

os três testados. Os valores de rigidez das misturas recicladas se justificam pela presença predominante do CAP do RAP para os menores teores testados, que determina o comportamento da mistura pela sua excessiva rigidez provocada pelo seu envelhecimento. Prova disso é que as misturas testadas sem acréscimo de CAP novo foram as que apresentaram maiores valores de estabilidade e menores valores de deformação (fluência) nas três misturas estudadas.

Do ponto de vista de atendimento da ES DNIT 33 (DNIT, 2005), cuja exigência de estabilidade mínima é de 500 kgf, conforme linha tracejada da Figura 5 (a), todas as misturas atenderam a esse parâmetro. Quanto a fluência esse parâmetro é utilizado atualmente apenas para avaliar a tendência de deformação de misturas asfálticas, não existindo mais, entretanto, exigência desse parâmetro em norma para aprovação de projeto de traço de misturas asfálticas. Na Figura 5 é possível observar o potencial das misturas recicladas, em termos de comportamento mecânico, conforme constatado por Lizárraga *et al.* (2018), Bolina da Cunha *et al.* (2018) e Unger Filho *et al.* (2020).

Figura 5 – Estabilidade e fluência Marshall das misturas recicladas



Fonte: Elaboração própria

3.3 TEORES PROMISSORES DAS MISTURAS RECICLADAS

Dentre todos os teores avaliados das três misturas recicladas projetadas, apresentados nas Figuras 4 e 5, estão reunidos na Tabela 7 aqueles

teores de CAP total de cada mistura que apresentaram os resultados mais promissores de volume de vazios (Vv), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume vazios (RBV), estabilidade e fluência, além dos limites

estabelecidos pela ES DNIT 33 (DNIT, 2005). Dos resultados apresentados na Tabela 7, observa-se que dentre as exigências da ES DNIT 33 (DNIT, 2005) para a mistura contendo o RAP da BR-324 apenas relação betume vazios (RBV) ficou ligeiramente acima do limite máximo exigido pela referida norma. Para o traço com RAP da BA-093, entretanto, além da RBV o volume de vazios também ficou fora dos limites estabelecidos. Como estes dois materiais fresados tem em comum a elevada idade (10 anos, aproximadamente) e o elevado percentual de participação na mistura reciclada (acima de 70%), a estratégia adotada de utilização de um teor

maior de CAP novo na mistura com o RAP da BR-324 (3%) apontou uma tendência de maior demanda de ligante novo por esta mistura com RAP mais antigo. As dosagens realizadas com estes dois fresados (BR-324 e BA-093) demonstraram a dificuldade de dosar misturas com RAP mais antigo, sem uso de agente rejuvenescedor, onde ambos apresentaram comportamentos similares até a adição de 2,5% de CAP novo, aproximadamente, onde somente foi possível melhorar a performance da mistura contendo RAP da BR-324 com o aumento do CAP novo para algo em torno de 3% (6,98% de CAP total).

Tabela 7 – Parâmetros das misturas recicladas nos teores considerados promissores

Origem do RAP	Teor de CAP total (%)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)
BR-324	6,98	3,38	19,44	82,77	810,60	6,60
BA-093	6,54	7,19	22,34	67,88	1331,73	5,08
BR-101	6,54	4,78	20,24	76,42	837,38	5,84
ES DNIT 33	4,5 a 9,0	3 a 5	Min. 15	75 a 82	Min. 500	-

Fonte: ES DNIT 33 (DNIT, 2005)

Por fim, para a mistura com RAP da BR-101 os resultados com 6,54% de CAP total possibilitaram o atendimento de todas exigências da ES DNIT 33 (DNIT, 2005). Com isso, dois aspectos carecem de destaque nestes resultados obtidos: O primeiro deles, já mencionado anteriormente, está relacionado a idade do RAP e, conseqüentemente, o nível de envelhecimento do CAP residual presente no RAP; O segundo aspecto, não menos importante para misturas sem uso de agente rejuvenescedor, é a quantidade de RAP a ser utilizado em misturas recicladas à quente. Os resultados obtidos com os três materiais fresados do presente estudo apontam que a utilização de elevados teores de RAP em misturas recicladas, sem uso de agente rejuvenescedor, não é uma tarefa trivial, conforme constatado por Suzuki *et al.* (2023).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação do uso de materiais fresados de diferentes origens em misturas asfálticas recicladas demonstrou que a idade do resíduo influencia na dosagem e, principalmente, no consumo de CAP novo para viabilização da mistura para utilização como camada de revestimento de rodovias de tráfego pesado ($N > 5 \times 10^6$). Para materiais fresados mais antigos o uso de agentes rejuvenescedores pode ser uma alternativa interessante na medida em que esse aditivo desempenhará o papel de rejuvenescer o ligante envelhecido do RAP, minimizando a necessidade de CAP novo. Por outro lado, a mistura com o RAP da BR-101 mostrou que a juventude do ligante residual contribuiu para que essa mistura apresentasse o melhor desempenho entre as três misturas testadas e com baixa demanda por CAP novo. Por fim, cabe destacar que a

técnica da reciclagem a quente, utilizando resíduo de mistura asfáltica envelhecida, já é uma realidade, proporcionando atualmente

ganhos financeiros e ambientais expressivos, principalmente nos trechos de rodovias sob concessão.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA-COSTA, A., BENTA, A. **Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt**. Journal of Cleaner Production, vol. 112, p. 2308-2317, jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.077>
- BOLINA DA CUNHA, C., BUDNY, J., KLAMT, R. A., CENTOFANTE, R., BARONI, M. **Avaliação de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado**. Revista Matéria, vol. 23, n. 3, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0520>
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES (CNT). **Anuário CNT do Transporte 2022**. Disponível em: <http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/inicial>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 4 - Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994a.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 43: Mistura betuminosa a quente – Ensaio Marshall**, RJ, Brasil, 1995.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 53: Mistura betuminosa – porcentagem de betume**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994b.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 81: Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998a.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 83: Agregados – Análise granulométrica**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998b.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 84: Agregado miúdo – determinação da densidade real**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998c.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 117: Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994c.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 148: Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland)**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994d.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 33: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 95: Cimentos asfálticos de petróleo**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006b.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 131: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010a.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 155: Material asfáltico – Determinação da penetração**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010b.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **IPR – 720: Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro. 310 p. 2006c.
- GASPAR, M. S., VASCONCELOS, K. L., LOPES, M. M., BERNUCCI, L. L. B. **Evaluation of binder blending on warm mix asphalt recycling**. Revista Transportes, vol. 28, n. 2, p. 87–99, mai. 2020. <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i2.2133>.
- IZAKS, R., HARITONOV, V., KLASA, I., ZAUMANIS, M. **Hot Mix Asphalt With High RAP Content**. Procedia Engineering, vol. 114, p. 676-684, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.009>.

LIZÁRRAGA, J. M., RAMÍREZ, A., DÍAZ, P., MARCOBAL, J. R., GALLEGU, J. **Short-term performance appraisal of half-warm mix asphalt mixtures containing high (70%) and total RAP contents (100%): From laboratory mix design to its full-scale implementation.** Construction and Building Materials, vol. 170, p. 433–445, mai. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.051>

MOGHADDAM, T. B., BAAJ, H. **The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review.** Construction and Building Materials, vol. 114, p. 805–816, jul. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.015>

RAPOSEIRAS, A., MOVILLA, D., VARGAS, A., BILBAO, R., CIFUENTES, C. **Technological, environmental and economic aspects of Asphalt recycling for road construction evaluation of Marshall stiffness, indirect tensile stress and resilient modulus in asphalt mixes with reclaimed asphalt pavement and copper slag.** Renewable and Sustainable Energy Review Revista Ingeniería de Construcción, vol. 32, n. 1, p. 15–24, abr. 2017. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000100002>

SEGUNDO, I. G. R., BRANCO, V. T. F. C., VASCONCELOS, K. L., HOLANDA, A. S. **Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado.** Revista Transportes, vol. 24, n. 4, p. 85-94, dez. 2016. <https://doi.org/10.14295/transportes.v24i4.1148>

SUZUKI, K., VASCONCELOS, K., KLINSKY, L. M., BESSA, I. **Evaluation of recycled asphalt mixtures with different RAP contents and the effect of recycling agent.** Road Materials and Pavement Design, vol. ahead-of-print, p. 1-13, 2023. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2191739>

UNGER FILHO, W., 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, vol. 2020, p. 1-12, abr. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5863458>

XIE, Z., ASCE, S. M., TRAN, N., JULIAN, G., TAYLOR, A., BLACKBURN, L. D. **Performance of Asphalt Mixtures with High Recycled Contents Using Rejuvenators and Warm-Mix Additive: Field and Lab Experiments.** Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 29, n. 10, out. 2017. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002037](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002037)

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA E O POTENCIAL USO NO BRASIL

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF ROAD PAVEMENTS: A LITERATURE REVIEW AND POTENTIAL USE IN BRAZIL

Bruno Vendramini dos Santos - bruno.vendramini@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0001-2764-7467>

Carlos Antônio Gomes Coelho - carlos.coelho@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0005-2844-4177>

João Henrique Silva Rêgo - jhenriquerego@unb.br - <https://orcid.org/0000-0001-9060-2010>

RESUMO: Este artigo apresenta uma revisão da literatura sobre os recentes avanços ligados aos estudos de impacto ambiental de pavimentos rodoviários, tendo como referência os conceitos de Avaliação do Ciclo de Vida. É apresentada uma introdução com as principais motivações para o desenvolvimento da pesquisa, com um panorama atual da infraestrutura de transporte brasileira, as projeções para o modo rodoviário para os próximos anos e a possibilidade de emprego da referida metodologia pelo setor rodoviário do Brasil. O artigo explora a origem da ACV em pavimentos rodoviários e os detalhes vinculados à sua implementação sob a perspectiva das quatro principais fases do estudo (objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação). Por fim, são reunidos os principais avanços e as deficiências observadas nas pesquisas selecionadas, com a proposição de campos de pesquisa que podem ser explorados em futuros estudos nacionais ou internacionais de ACV de pavimentos rodoviários.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação do Ciclo de Vida – ACV; Brasil; pavimentos rodoviários; sustentabilidade.

ABSTRACT: *The article presents a literature review on recent advances in environmental impact studies of road pavements, with reference to the concepts of Life Cycle Assessment. An introduction with the main motivations for developing the research is presented, with a current overview of the Brazilian transport infrastructure, projections for road mode for the coming years and the possibility of using the referred methodology by the road sector in Brazil. The article explores the origin of LCA in road pavements and the details linked to its implementation from the perspective of the four main phases of the study (goal and scope, inventory analysis, impact assessment and interpretation). Finally, the main advances and deficiencies observed in the selected studies are gathered, with the proposition of research fields that can be explored in future national or international road pavements LCA studies.*

KEYWORDS: *Life cycle assessment; Brazil; road pavements; sustainability.*

1 INTRODUÇÃO

Muitas agências, companhias e organizações mundiais estão envolvidas em diretrizes que

incentivam atividades ou negócios cada vez mais sustentáveis. Os principais objetivos estão no desenvolvimento de estratégias capazes de

combinar fatores sociais, econômicos e ambientais. O termo sustentabilidade não é novo, sendo que, em muitos casos, decisões são tomadas levando-se em considerações os seus princípios, ainda que indiretamente, mas, nos últimos anos, estão sendo empreendidos esforços com a finalidade de identificar e quantificar os efeitos da sustentabilidade de forma mais sistemática e organizada (Jensen, Hoffman, *et al.*, 1997).

A indústria da construção civil desempenha um papel central na economia de diversos países. Em contrapartida, é responsável por um elevado consumo de recursos naturais e energia, bem como produção de resíduos. No ano de 2021, o setor da construção respondeu pelo consumo de 30% da energia global (135 EJ) em forma de eletricidade e gases, combustíveis líquidos e sólidos, englobando ainda distintas formas de consumo de energia durante as fases de operação e manutenção dos ativos, além de responder por aproximadamente 27% das emissões globais de CO₂ (ONU, 2022).

O setor de infraestrutura de transportes, por sua vez, além de ser reconhecido como a espinha dorsal da economia moderna (OECD, 2013), tem um papel decisivo nos indicadores de sustentabilidade de diversos países. Por exemplo, no Brasil, tal setor responde pela projeção estimada de 189 milhões de toneladas de CO₂ equivalentes para o ano de 2035, emitidas pelos principais modos de transporte de cargas, dos quais aproximadamente 80% estão sob a responsabilidade do rodoviário (EPL, 2021). A preponderância do modo de transporte rodoviário em muitos países e a magnitude da cadeia produtiva ligada a uma infraestrutura rodoviária, que engloba etapas como a extração de elevados volumes de matérias-primas da natureza, o seu beneficiamento em centrais industriais,

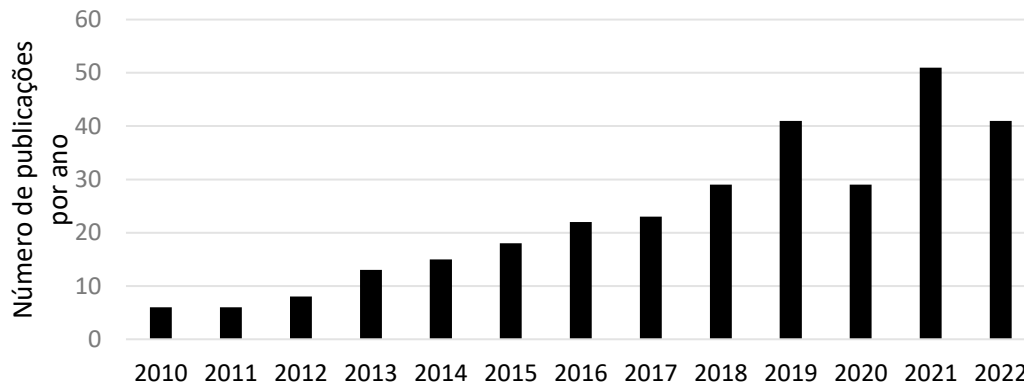
transporte, execução das obras e a posterior manutenção dos ativos construídos, cuja etapa demanda a extração de novas quantidades de matérias-primas da natureza, novos processamentos industriais e a realização de atividades potencialmente poluidoras ao longo da vida útil das estruturas, evidenciam a forte influência do setor no atual contexto da sustentabilidade. Pesquisas ligadas à sustentabilidade de pavimentos rodoviários tiveram um expressivo crescimento ao longo dos últimos anos (Figura 1), demonstrando a relevância do tema atualmente. Muitas das pesquisas estão voltadas à implementação de novas tecnologias para a construção de pavimentos, como o uso de materiais reciclados e adições provenientes de subprodutos industriais (Chen e Wang, 2018), e a investigação das várias fases do ciclo de vida dos pavimentos com a finalidade adaptar a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV aos problemas enfrentados na sua construção, operação, manutenção e reabilitação (Shi, Mukhopadhyay, *et al.*, 2019; Zheng, Easa, *et al.*, 2019).

Sob essa perspectiva, algumas iniciativas governamentais foram pensadas com a finalidade de identificar e quantificar os impactos ambientais vinculados ao ciclo de vida de pavimentos rodoviários. A título de exemplo, o programa de sustentabilidade conduzido pela *Federal Highway Administration* (FHWA), agência do departamento de transportes dos EUA, possui um investimento atual de 7,1 milhões de dólares, distribuídos entre 35 projetos de 27 agências rodoviárias estaduais, tendo como finalidade a redução das emissões de CO₂ pelas diversas intervenções realizadas ao longo do ciclo de vida de pavimentos rodoviários (FHWA, 2023). Os projetos têm como base central os princípios de avaliação de impactos ambientais dados pela série de normas da

International Organization for Standardization – ISO 14044 (2014) e ISO 14040 (2014). Além disso, o governo americano prevê a reserva de 6,4 trilhões de dólares a serem aplicados até 2026 em programas do setor de infraestrutura

destinados à redução dos atuais índices de emissão de CO₂, um investimento que representa 2,4% do total destinado ao mesmo setor para o período de 2022 – 2026 (*Government*, 2022).

Figura 1 – Número de artigos com descritores “ACV” e “pavimento” desde 2010



Fonte: Pesquisa realizada na base de dados da *Web of Science* em dezembro de 2022.

Diversos países possuem uma infraestrutura de transporte dominada pelo modo rodoviário e, em determinados casos, têm projeções de elevados investimentos para a expansão e a manutenção de sua malha viária (OECD, 2013). Esse é um cenário que demonstra o papel decisivo do setor de transportes no cumprimento de objetivos e metas nacionais de sustentabilidade, sobretudo pelos países signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, como o Brasil. Por meio do Acordo de Paris, o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de redução de 43%, em 2030, em relação aos níveis de emissões estimados para 2005 (MCTIC, 2015).

A infraestrutura de transporte brasileira é dominada pelo modo rodoviário, com uma malha total de 121 mil km, dos quais 46 mil km (38%) são classificados como rede planejada, 9,3 mil km (7,7%) como rede não pavimentada e 65,7 mil km (54,3%) como rede pavimentada (DNIT, 2022). Contudo, ainda que o planejamento da logística

de transportes federal considere os diferentes impactos ambientais causados pelos principais modos de transporte utilizados no Brasil, a exemplo do que consta no Plano Nacional de Logística – PNL 2035 (EPL, 2021) e no manual Metodologia EPL – IEMA para Emissões de GEE e Poluentes Locais (EPL, 2022), é realizada uma análise macro que objetiva quantificar as emissões de gases de efeito estufa decorrentes do consumo de combustíveis pelos veículos automotores (o que inclui variáveis como distância percorrida, energia consumida e tipos de carga transportada), ou seja, trata-se de uma avaliação que não contempla os impactos causados por outras variáveis e fases do ciclo de vida dos empreendimentos, como a emissão total de CO₂ decorrente das obras de construção e de manutenção das diferentes infraestruturas que integram os modos de transportes.

Aliado a isso, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, autarquia vinculada ao Ministério dos Transportes do Governo Federal do Brasil, que responde, dentre outros assuntos, pelo desenvolvimento de

pesquisas e normas técnicas destinadas à execução e gerenciamento de empreendimentos ligados ao setor da infraestrutura de transportes, não dispõe de uma regulamentação técnica específica para identificar e quantificar os impactos ambientais vinculados às alternativas ou soluções de engenharia previstas em seus próprios manuais de projeto, a exemplo da quantidade de CO₂ emitida durante as fases de execução e manutenção de um pavimento rígido de cimento Portland ou de um pavimento flexível de cimento asfáltico de petróleo. A ausência de normalização sobre a análise dos impactos ambientais baseada na metodologia de ACV pelas instituições técnicas do governo federal pode ser interpretada, sob certa medida, como uma barreira ao desenvolvimento do tema na área de infraestrutura de transportes nacional, pois não traz ao gestor ou ao consultor contratado a obrigação de considerar a referida metodologia nas fases de planejamento e desenvolvimento dos projetos de engenharia, com o reflexo indireto dessa postura nos diversos departamentos de estradas estaduais e municipais distribuídos pelo país.

Assim, considerando a crescente abordagem mundial sobre questões ligadas ao desenvolvimento sustentável de atividades do setor de infraestrutura de transportes e a importância do tema para a realidade nacional, com projeções de ampliação e novos programas de manutenção de sua malha rodoviária, este artigo explora os recentes avanços em termos de pesquisas sobre a avaliação de impacto ambiental de pavimentos rodoviários, com enfoque aos princípios e estruturas da Avaliação de Ciclo de Vida – ACV, das normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014). Além disso, este artigo tem os seguintes objetivos específicos: (i) explorar os recentes

avanços em termos de ACV de pavimentos rodoviários; (ii) identificar as potenciais lacunas de conhecimento para o desenvolvimento de novos estudos, e (iii) avaliar a possibilidade de aplicação da metodologia ACV nos processos de decisão envolvendo os pavimentos rodoviários do Brasil.

2 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa adotada por este artigo refere-se à revisão sistemática da literatura, a qual é a revisão das pesquisas e das discussões de outros autores sobre o tema que será abordado no trabalho (Galvão e Ricarte, 2020). Ou seja, trata-se das teorias de outros autores para a pesquisa em tela.

Para o estudo em questão foi empregada a metodologia “Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado – TEMAC” (Mariano e Rocha, 2017). Para o planejamento da pesquisa foram utilizadas como palavras-chave as seguintes combinações: *life cycle assessment*, LCA e *pavement* na base de dados *Web Of Science* para os anos de 2010 a 2022 e, complementarmente, em sites web de instituições públicas e privadas ligadas ao tema da pesquisa. Tendo em vista a diversidade de material obtido com a investigação (240 publicações), tornou-se necessária a aplicação de filtros de seleção, visando desconsiderar assuntos que não guardavam correlação direta com o escopo desta pesquisa, o que resultou na seleção final de 36 artigos.

A análise dos artigos foi realizada sob a ótica de dois eixos: um primeiro, relativo à origem e histórico de emprego da ACV em pavimentos rodoviários, e um segundo, vinculado aos detalhes de aplicação da ACV em pavimentos rodoviários sob a ótica das principais fases de sua metodologia (i. definição de objetivo e escopo; ii. análise de inventário; iii. avaliação de impactos, e iv. interpretação).

3 ACV EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

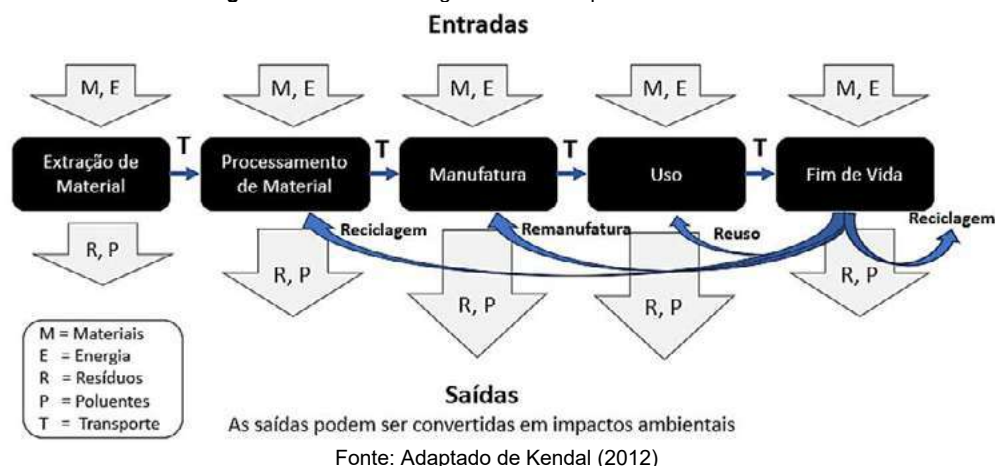
3.1 ORIGEM DA ACV E O SEU EMPREGO EM PAVIMENTOS

As discussões relacionadas à ACV foram iniciadas no final da década de 1960, visando analisar as emissões de poluentes na atmosfera, no solo e em corpos hídricos. Após isso, houve uma expansão de seus princípios, com a finalidade de incluir poluentes químicos, o uso de energia e de recursos naturais, com enfoque nos processos de produtos de consumo comercial, portanto, com uma visão voltada à indústria da produção e sem uma relação direta com o setor de infraestrutura de transportes (Guinée, 2012). Os primeiros estudos relacionados à aplicação da metodologia de ACV em pavimentos rodoviários remontam ao final da década de 1990, com publicações de estudos focados nas diferentes fases de seu ciclo de vida, incluindo pavimentos de asfalto e de concreto. Contudo, as primeiras investigações da bibliografia revelaram que as pesquisas não apresentavam uma uniformidade em termos de definição de indicadores, quantificação e avaliação objetiva dos impactos ambientais causados pelas distintas fases do ciclo de vida de um pavimento. Esses apontamentos foram realizados inicialmente por Santero, Masanet e Horvath (2011), que conduziram uma das primeiras revisões da literatura sobre os

impactos ambientais de pavimentos com base na metodologia de estudo dada pela série de normas da ISO 14040, publicação que forneceu um resumo com a aplicação da ACV em pavimentos até o ano de 2011 e apresentou recomendações a serem adotadas para a implementação da referida metodologia nas fases de construção, operação e fim da vida útil dos pavimentos. Outras importantes publicações foram efetuadas sobre o tema ao longo dos últimos anos, também como revisão da literatura, a exemplo de Azarijafari, Yahia e Ben Amor (2016), Babashamsi, Yusoff *et al.* (2016), Ghalandari, Hasheminejad *et al.* (2021), Liu, Balieu e Kringos (2022), Hu, Shu e Huang (2019) e Inyim, Pereyra *et al.* (2016).

Em linhas gerais, o atual conceito da metodologia ACV traz uma abordagem fundamentada na avaliação dos impactos ambientais de um sistema que contempla o ciclo de vida de um produto ou material; portanto, não há uma associação direta da referida metodologia com casos específicos de estudo para pavimentos rodoviários, cabendo ao avaliador definir as condições de contorno e as adaptações aplicáveis a cada situação. Os estágios e os fluxos de dados (entradas e saídas) relacionados às etapas do ciclo de vida típico de um pavimento rodoviário estão representados na Figura 2.

Figura 2 – Ciclo de vida genérico de um pavimento rodoviário

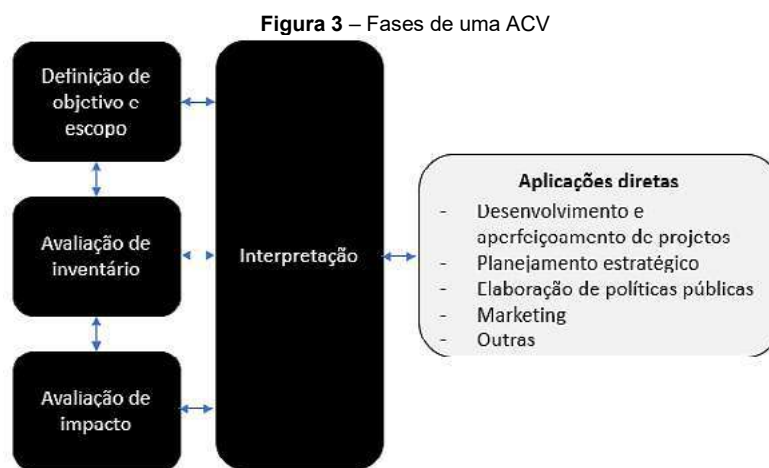


O ciclo de vida típico de um pavimento rodoviário, detalhado na Figura 2, inclui a extração de matérias-primas da natureza e o seu consequente beneficiamento, construção, manutenção e reabilitação, uso e estágio final da vida útil das estruturas.

O processo de avaliação de impacto ambiental baseado na metodologia ACV é governado pela série de normas ISO (14040 e 14044), incorporadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT por meio das normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014). Para essas referências, e como apresentado na Figura 3, um estudo de ACV é composto por quatro fases relacionadas entre si, quais sejam: (i) a fase de definição de objetivo e escopo; (ii) a fase de análise de inventário; (iii) a fase de avaliação de impactos, e (iv) a fase de interpretação. Segundo a NBR ISO

14040 (ABNT, 2014), os resultados da ACV podem ser aplicados em processos decisórios que envolvam o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de produtos, planejamento estratégico, elaboração de políticas públicas, entre outros.

Assim, em que pese os recentes avanços em termos de pesquisas sobre a aplicação da metodologia de ACV em pavimentos rodoviários e de programas governamentais voltados a essa mesma finalidade, ainda há uma série de incertezas sobre o efetivo emprego de seus conceitos pelas diversas corporações ligadas ao setor de infraestrutura de transportes. Por esse motivo, as próximas seções deste artigo estão dedicadas ao detalhamento das principais constatações da bibliografia sobre ACV de pavimentos rodoviários, tendo como referência as quatro fases de estudo da norma NBR ISO 14040.



Fonte: Adaptado de NBR 1404 (ABNT, 2014)

3.2 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

Os princípios metodológicos associados à etapa de objetivo e escopo incluem definições como a aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo, público-alvo, dados e seus requisitos, fronteira do sistema, unidade funcional, procedimentos de alocação, metodologia de avaliação dos impactos, tipos de impacto e limitações do estudo (ABNT, 2014).

Os objetivos vinculados ao estudo de ACV de pavimentos rodoviários são diversificados, sendo que são tipicamente realizadas análises comparativas entre pavimentos rígidos (cimento Portland) e flexíveis (cimento asfáltico de petróleo), a exemplo dos trabalhos desenvolvidos por Jullien, Dauvergne e Cerezo (2014) e Kucukvar e Tatari (2012). Das 36 pesquisas analisadas, nove (25%) tiveram em seu escopo

esse tipo de análise comparativa. Outras pesquisas ficaram concentradas na investigação dos impactos ambientais causados pelo emprego de diferentes tipos de materiais, a maioria com a finalidade de reduzir o consumo de cimentos, agregados naturais ou insumos asfálticos. O estudo desenvolvido por Chen e Wang (2018), por exemplo, investigou os impactos na emissão total de CO₂ e no consumo de energia primária de pavimentos flexíveis construídos com asfalto reciclado, realizando uma comparação direta com um pavimento flexível, sem a adição de reciclados em sua composição. O estudo desenvolvido por Shi, Mukhopadhyay, *et al.* (2019) também avaliou os impactos ambientais associados ao emprego de material reciclado na constituição de pavimentos rodoviários, mas dessa vez para pavimentos rígidos, e com uma abordagem que agregou variáveis sociais e econômicas. Outras pesquisas também realizaram a análise dos impactos ambientais combinados com aspectos econômicos e sociais, um tipo de análise relativamente recente e pouco representativa na amostra de pesquisas analisadas (Kunhee Choi, Lee e Mao, 2016; Zheng, Easa, *et al.*, 2019). Santos, Ferreira *et al.* (2018), por sua vez, avaliaram os impactos ambientais de diferentes planos de manutenção e restauração de pavimentos, mas englobando à análise a combinação com aspectos econômicos, apenas.

Associada à fase de escopo e objetivo, a unidade funcional é de fundamental importância para a análise dos resultados de ACV de pavimentos, pois ela fornece o parâmetro de desempenho das estruturas, definida pela NBR ISO 14040:2014 como “uma referência em relação à qual os dados de entrada e saída são normalizados”, devendo ser, portanto, uma propriedade mensurável e comparável. Nos artigos pesquisados, diferentes unidades

funcionais foram utilizadas, a exemplo do comprimento e largura das faixas de rolamento (Han Zhang, Lepech, *et al.*, 2010), massa de materiais (Tokede, Whittaker, *et al.*, 2020) e parâmetros funcionais do pavimento como a sua irregularidade longitudinal (Santos, Ferreira, *et al.*, 2018) e (Xu, Akbarian, *et al.*, 2019). A unidade funcional “extensão linear-faixas de rolamento” foi a mais empregada pelos autores, principalmente para a fase de uso dos pavimentos.

Contudo, muitas das unidades funcionais dos estudos de ACV de pavimentos não agregam informações relacionadas ao seu estado de conservação, tampouco sobre a evolução de suas condições funcionais ao longo do tempo. Uma determinada solução de pavimento pode causar menores impactos ambientais na etapa de construção inicial, mas, se as condições de manutenção do pavimento forem ruins durante o período de uso, com a presença de muitas irregularidades ou defeitos em sua superfície, o consumo de combustíveis pelos veículos será maior, assim como a taxa de deterioração do pavimento, o que demandará um plano de manutenção mais robusto, se comparado ao de um pavimento com melhores índices de serviço.

Assim, para uma adequada comparação entre as alternativas, deve-se agregar às unidades funcionais de ACV de pavimentos parâmetros mensuráveis. Por exemplo, estabelecidas as características da superfície de rolamento e o período de uso, seriam quantificadas as intervenções de manutenção necessárias em cada alternativa com a finalidade de manter os parâmetros de desempenho em patamares aceitáveis mínimos, sendo possível assim quantificar as diferenças em termos de impacto ambiental de cada solução em função do tipo e do número de intervenções realizadas no período. Segundo Xu, Akbarian *et al.* (2019), com

os recentes avanços de ACV para a fase de uso dos pavimentos, modelos de análise com unidades funcionais vinculadas à rugosidade, deflexão e textura da superfície de rolamento estão sendo cada vez mais difundidos pela literatura. Contudo, os mesmos autores destacam que variações como a solução de engenharia e o contexto de análise de cada estudo dificultam a comparação dos resultados e a consequente compreensão da influência das propriedades funcionais do pavimento nas distintas categorias de impacto ambiental existentes.

O estudo desenvolvido por Loijos, Santero e Ochsendorf (2013) definiu 12 unidades funcionais que permitiram a avaliação de distintos tipos de impactos ambientais para as fases do ciclo de vida de pavimentos rígidos de concreto, incluindo a fase de uso. A pesquisa desenvolvida por Bryce, Katicha, *et al.* (2014) também segue a lógica de emprego de distintas unidades funcionais, possibilitando a avaliação dos impactos ambientais ao longo de todos os estágios do ciclo de vida dos pavimentos. Contudo, percebe-se que a ausência de uniformização em relação às unidades funcionais empregadas nas pesquisas selecionadas impossibilita a análise comparativa dos resultados (Santero, Masanet e Horvath, 2011; Xu, Akbarian, *et al.*, 2019).

A fase de escopo de um estudo de ACV responde também pela definição do sistema de análise, estabelecendo limites geográficos e temporais, assim como requisitos de qualidade dos dados para a realização do estudo. Ao longo dos últimos anos, diversas ferramentas de ACV foram desenvolvidas, com sistemas previamente delimitados e com muitos conjuntos de dados. Contudo, muitas dessas ferramentas comerciais não são utilizadas pelas entidades ligadas ao setor de transportes por possuírem sistemas com limites muito amplos e que não refletem as

situações reais ligadas às etapas de projeto, de construção e de manutenção das rodovias (Butt, Mirzadeh, *et al.*, 2014). A literatura aponta ainda que as principais ferramentas empregadas na análise de sustentabilidade de pavimentos rodoviários são CEEQUAL (Inglaterra), *BE2ST-in-Highways™* PaLATE (EUA), *GreenPave* (Canadá), *Greenroads* v3 (EUA) e *Invest* (EUA) (Mattinzioli, Sol-Sánchez *et al.*, 2020). Já em relação aos estudos selecionados, o software “SimaPro” foi o mais empregado. Cabe observar, contudo, que não foram identificadas pesquisas destinadas a avaliar o emprego da metodologia BIM (*Building Information Modeling*) nos processos de ACV de pavimentos rodoviários, ou seja, aparentemente, as ferramentas comumente utilizadas na ACV de pavimentos ainda não exploram os avanços oferecidos pelo BIM.

As pesquisas de ACV de pavimentos apresentam variações significativas também em termos de período e fase do ciclo de vida. Em determinadas situações, pesquisas com escopos e objetivos semelhantes possuem períodos de análise significativamente distintos, como as pesquisas desenvolvidas por Chen e Wang, (2018) e Shi *et al.* (2019), que, apesar de contemplarem as mesmas fases do ciclo de vida, realizam investigações para intervalos de vida útil das estruturas de 100 e 27 anos, respectivamente. Como detalhado na Tabela 1, também não há uniformidade em relação às etapas do ciclo de vida contempladas nos estudos, com a presença de sistemas que consideram uma única fase (Chen, Wang, *et al.*, 2021) ou todas as fases do ciclo de vida do pavimento (Chen e Wang, 2018).

Algumas definições relacionadas à fase de objetivo e escopo são influenciadas pelas informações e pela qualidade dos dados disponíveis (Alam, Hossain e Bazan, 2022). As

pesquisas analisadas demonstram um relativo avanço em termos de organização de informações vinculadas aos países da União Europeia e dos Estados Unidos da América (ECOINVENT, ECORCE e *Portland Cement Association*), mas ainda assim com uma grande dispersão de fontes de informações e com incertezas quanto à representatividade dos dados

no contexto individual de cada pesquisa realizada.

A seção 3.3 deste artigo explora em detalhes o contexto dos dados na ACV de pavimentos rodoviários.

A Tabela 1, apresentada a seguir, traz uma síntese de publicações de ACV de pavimentos rodoviários com algumas de suas principais variáveis.

Tabela 1 – Exemplos de publicações de ACV de pavimentos rodoviários: variáveis de estudo

Ref.	Objetivo & Escopo	Fase(s) considerada(s)	Período considerado	Unidade funcional	Saídas	Software (S) Base de dados (BD) Metodologia de impacto (MI)	Local
(Han Zhang, Lepech, et al., 2010)	Desenvolvimento de um modelo de ACV para avaliar os benefícios ambientais associados ao emprego de diferentes alternativas para a conservação de pavimentos.	produção de materiais, construção, distribuição, tráfego, uso, e fim da vida útil.	40 anos	10 km de extensão com quatro faixas de rolamento. Capa adicional de revestimento: 100 mm de espessura	Consumo de energia (J) Emissão de CO ₂ (t) Emissão de poluentes na atmosfera (NO _x , SO _x , NMHCs) (kg) Emissão de poluentes na água (BOD e amônia) (kg)	(S): SimaPro 6.0 (BD): <i>Portland Cement Association</i> PCA 2002 e fontes locais. (MI): Não adotado	EUA
(Kucukvar e Tatari, 2012)	Realiza a comparação de impactos ambientais associados a pavimentos rígidos de concreto (com o emprego de reforço e adição mineral de cinza volante) e de pavimento flexíveis de asfalto.	extração de materiais, manufatura, transporte e construção.	Não especificado	Diversas: km linear de pista kg (matéria-prima e produto final) Energia (J) GFE (em termos de energia (J)).	CO ₂ e (kg) Energia (J)	(S): não especificado (BD): <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> e pesquisas anteriores. (MI): Não adotado	EUA
(Jullien, Dauvergne e Cerezo, 2014)	Avaliação dos impactos ambientais, tendo como base a metodologia ACV, de pavimentos rígidos e flexíveis.	construção e manutenção	30 anos	25x10 ⁶ veículo/ano/faixa em 1 km de extensão com duas faixas de rolamento	Energia (GJ) Emissão de CO ₂ (t)	(S): ECORCE (BD): base de dados do ECORCE. (MI): própria do ECORCE	Frância
(Kunhee Choi, Lee e Mao, 2016)	Estudo de diferentes alternativas de solução técnica para a reabilitação de pavimentos rígidos. Estimados os impactos ambientais, econômicos e sociais das alternativas por meio de um modelo específico de ACV.	manutenção e restauração	50 anos	Diversas	GEE (tCO ₂); Energia (TJ), Resíduos (kg), Economia gerada (\$),	(S): EIO-LCA (BD): dados públicos do EIO-LCA (MI): própria do EIO-LCA	EUA
(Chen e Wang, 2018)	Quantificação dos GEE's emitidos por pavimentos flexíveis em função do teor de asfalto de pavimento reciclado (RAP) incluído empregado em sua constituição. O estudo foi realizado com base na metodologia ACV.	extração de matéria-prima, beneficiamento, construção, manutenção, operação e final do ciclo de vida.	100 anos	1 milha x 200 ft	Consumo de energia (MJ/t) Emissão de CO ₂ equivalente	(S): Não especificado (BD): Ecoinvent v2.2; dados públicos; pesquisas técnicas, agências governamentais e instituições acadêmicas. (MI): IPCC	EUA
(Xu, Akbarian, et al., 2019)	Avalia os impactos ambientais atribuídos à fase de uso dos pavimentos, tendo como referência a evolução das condições da superfície de rolamento e a influência desta condição na emissão de GFE.	Uso	50 anos	IRI e deflexão do pavimento	Emissão de CO ₂ equivalente	(S): <i>Pavement ME</i> (BD): diversas (dados empíricos, <i>Ecoinvent</i>) (MI): Não adotado	EUA
(Tokede, Whittaker, et al., 2020)	Estudo dos impactos ambientais associados ao emprego de polímero natural em misturas asfálticas para a execução de pavimentos rodoviários.	Produção de materiais, transporte e uso	100 anos	Ton. asfalto	Emissão de CO ₂ equivalente	(S): SimaPro9.0. (BD): Ecoinvent.V3 e literatura. (MI): Não adotado	Austrália
(Chen, Wang, et al., 2021)	Avaliação do efeito albedo associado a estruturas de pavimento por meio da metodologia de estudo ACV.	Uso	20 e 40 anos	M² de plataforma	Emissão de CO ₂ equivalente	(S): não especificado (BD): pesquisas pretéritas (MI): não adotado	EUA

Fonte: Pesquisa realizada na base de dados da *Web of Science* em dezembro de 2022

3.3 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

A segunda etapa da ACV é a Análise de Inventário do Ciclo de Vida – ICV. A NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) esclarece que, nessa fase, devem ocorrer a coleta de dados e a definição dos procedimentos de cálculo, com a finalidade de quantificar as entradas e saídas de informações classificadas como relevantes para um determinado sistema. Os dados vinculados a cada subprocesso do sistema podem ser classificados da seguinte forma: (i) entradas de energia, entradas de matéria-prima, entradas auxiliares, outras entradas físicas; (ii) produtos, coprodutos e resíduos; (iii) emissões atmosféricas, descargas para a água e solo; e (iv) outros aspectos ambientais.

Como antecipado na seção 3.2 deste artigo e detalhado na Tabela 1, as bases de dados empregadas nos estudos de ACV de pavimentos rodoviários são diversificadas, sendo que, para algumas fases (como as de extração e produção de materiais), há uma maior diversidade de fontes de informação disponíveis, a exemplo das provenientes de entidades públicas e privadas como a *Portland Cement Association* – PCA (Han Zhang, Lepech, *et al.*, 2010) e a *Association of State Highway and Transportation Officials* (Kucukvar e Tatari, 2012), enquanto que, para outras fases (como as de uso, manutenção e restauração), é comum a obtenção de dados indiretamente por meio de modelos de cálculo, a exemplo da quantidade total de CO₂ emitida na atmosfera pelos veículos automotores, inclusive com variações em função das condições funcionais do pavimento ao longo do tempo (Santos, Ferreira, *et al.*, 2018), e da carbonatação sofrida por um determinado tipo de pavimento de concreto ao longo de toda a sua vida útil (Yu, Lu e Xu, 2013).

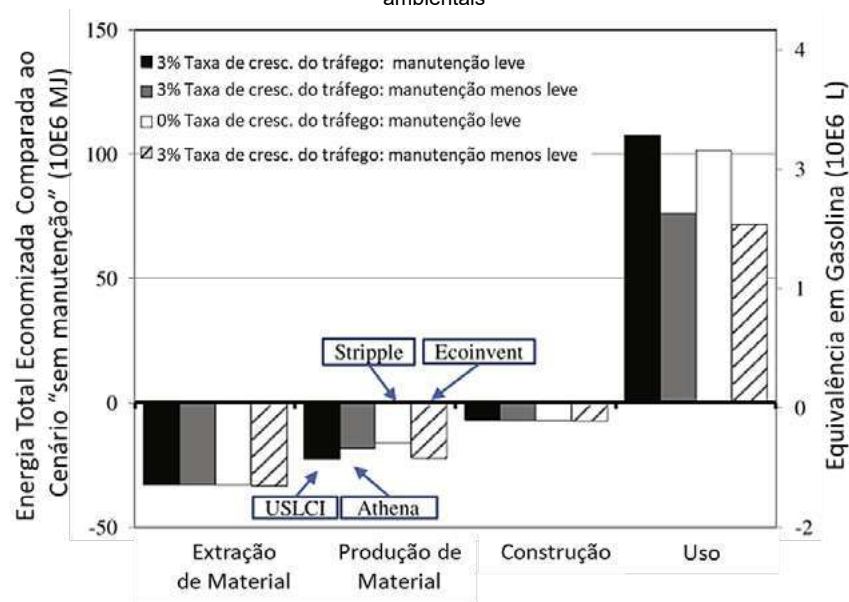
Em linhas gerais, pesquisas realizadas com dados obtidos por meio de aferições diretas ou disponíveis em bases de dados públicas (p.ex.: Ecoinvent) apresentam menores ponderações dos autores quanto à realização de análise prévia destinada a avaliar a sua adesão ou adequação à situação específica em estudo. Contudo, a pesquisa desenvolvida por Wang e Lee *et al.* (2012) exemplifica variações nos resultados de um estudo de ACV de pavimento em função do emprego de quatro diferentes bases de dados (Figura 4), uma análise de sensibilidade que não foi identificada em outras pesquisas. Em resumo, os referidos autores destacam que as diferenças entre os resultados são expressivas para as fases de produção dos materiais e uso da rodovia, enquanto para a fase de construção as diferenças praticamente não existem. Nesse mesmo sentido, a pesquisa desenvolvida por Santero, Masanet e Horvath (2011) apresenta um resumo com distintos valores de intensidade de energia consumida na produção de cimento, mas dessa vez em referência a dados divulgados por distintos pesquisadores (Figura 5). Isso demonstra a importância da análise crítica dos dados com a finalidade de adotar aqueles que sejam os mais representativos para o local de interesse.

Sob essa perspectiva, algumas iniciativas governamentais foram pensadas com a finalidade de identificar e quantificar os impactos ambientais vinculados ao ciclo de vida de pavimentos rodoviários. A título de exemplo, o programa de sustentabilidade conduzido pela *Federal Highway Administration* (FHWA), agência do departamento de transportes dos EUA, possui um investimento atual de 7,1 milhões de dólares, distribuídos entre 35 projetos de 27 agências rodoviárias estaduais, tendo como finalidade a redução das emissões de CO₂ pelas diversas intervenções realizadas ao

longo do ciclo de vida de pavimentos rodoviários (FHWA, 2023). Os projetos têm como base central os princípios de avaliação de impactos ambientais dados pela série de normas da *International Organization for Standardization* – ISO 14044 (2014) e ISO 14040 (2014). Além disso, o governo americano prevê a reserva de

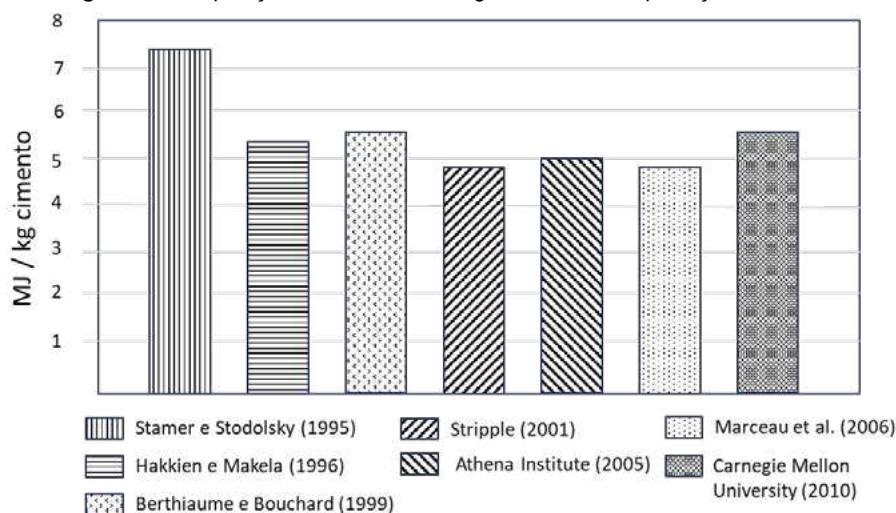
6,4 trilhões de dólares a serem aplicados até 2026 em programas do setor de infraestrutura destinados à redução dos atuais índices de emissão de CO₂, um investimento que representa 2,4% do total destinado ao mesmo setor para o período de 2022 – 2026 (Government, 2022).

Figura 4 – Consumo de energia em distintas fases do ciclo de vida de um pavimento e com diferentes bases de dados ambientais



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2012)

Figura 5 – Comparação entre autores: energia consumida na produção de cimento



Fonte: Adaptado de Santero, Masanet e Horvath (2011)

Os dados obtidos indiretamente (ou por meio de modelos teóricos), por sua vez, carregam uma margem de incerteza maior quando comparados aos obtidos diretamente, sobretudo pela maior

dificuldade de avaliação da aderência dos resultados advindos dos modelos teóricos com os provenientes das aferições de campo (Azarijafari, Yahia e Ben Amor, 2016). A Tabela 2 detalha

alguns dos modelos de cálculo empregados nos estudos de ACV de pavimentos rodoviários.

Cabe observar que parte dos modelos de cálculo listados na Tabela 2, e de outros empregados nas pesquisas selecionadas, realizam projeções sobre as condições funcionais e estruturais dos pavimentos com a finalidade de estimar os impactos no consumo de energia e de gases de efeito estufa emitidos pelos veículos. Sob esse aspecto, o DNIT, por meio do Plano

Nacional de Manutenção e Restauração Rodoviária – PNMRR (DNIT, 2018), realiza anualmente o levantamento das condições funcionais e estruturais dos pavimentos rodoviários que estão sob sua responsabilidade, inclusive com projeção dessas mesmas condições para os próximos anos. Essas informações podem subsidiar a aplicação inicial da ACV nas fases de uso, operação e manutenção das rodovias federais brasileiras.

Tabela 2 – ACV de pavimentos: exemplos de modelos de cálculo de emissão total de poluentes

Referência	Modelo de cálculo	Saídas do modelo
(Xu, Akbarian, <i>et al.</i> , 2019)	<i>United States Central Intelligence Agency (U.S. CIA)</i>	Emissão de gases de efeito estufa em função da irregularidade longitudinal do pavimento (IRI) e da idade do pavimento.
	Modelo de Lagerblad	Quantidade de CO ₂ absorvida por pavimentos de concreto em função do processo de carbonatação.
(Santos, Bressi, <i>et al.</i> , 2018)	COPERTv5.0	Emissão de poluentes e gases de efeito estufa na atmosfera em função de diferentes tipos e modelos de veículos.
	<i>Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI)'s</i>	Consumo de combustível e a emissão de gases de efeito estufa em função das condições funcionais da superfície de rolamento do pavimento.
(Wang, Lee, <i>et al.</i> , 2012)	EMFAC	Emissão total de CO ₂ pela operação de diferentes tipos de equipamentos.
	MOVES	Consumo de combustível e emissão de CO ₂ pelos veículos.
(Yu, Lu e Xu, 2013)	<i>Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET)</i>	Gases de efeito estufa e o combustível consumidos pelos veículos ao longo de toda a vida útil de um pavimento.

Fonte: Elaboração própria

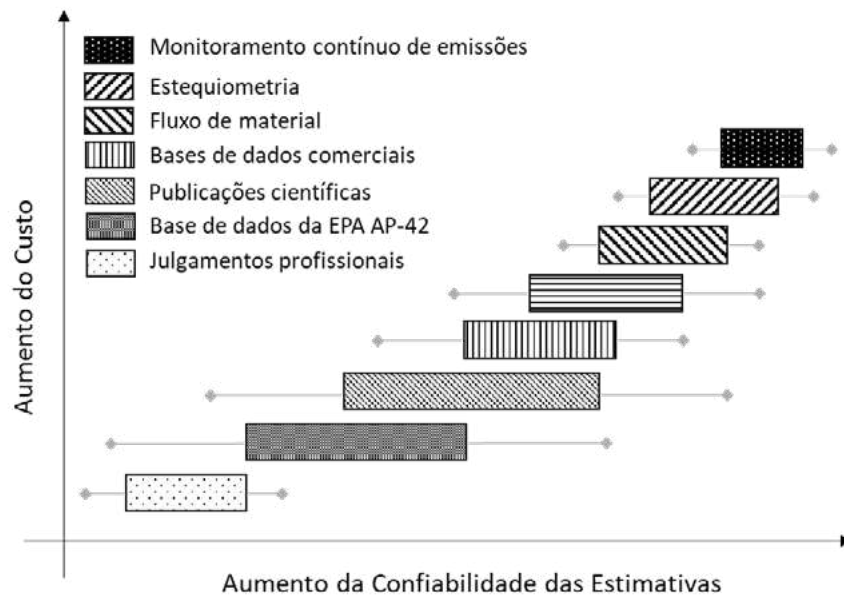
Além disso, sob um aspecto mais abrangente e considerando também a fase de construção dos pavimentos rodoviários, o DNIT possui, em suas referências normativas, as composições de custos com os insumos necessários (como a quantidade de insumos e equipamentos com os seus respectivos fatores de consumo de combustíveis) para todos os serviços de construção e de manutenção dos pavimentos rodoviários (DNIT, 2022). Isso pode ser interpretado como uma importante fonte de informação para os estudos de ACV dos pavimentos executados no Brasil, principalmente pelo fato de essas informações constarem em bases públicas e nos orçamentos dos projetos de

engenharia desenvolvidos ou contratados pelo setor público.

Algumas pesquisas empregam a análise combinada de distintas fontes de dados (diretas ou indiretas) nos estudos de ACV de pavimentos rodoviários. Segundo Harvey *et al.* (2016), o objetivo do estudo e os requisitos de qualidade dos dados, bem como os recursos disponíveis (como tempo e orçamento) influenciam na escolha das fontes de informação. Nesse sentido, a Figura 6 detalha os custos e a confiabilidade relativa de diferentes tipos de fontes de dados. Os dados relativos a julgamentos categorizados como profissionais são os que apresentam a menor combinação de custo e nível de

confiabilidade, enquanto os dados obtidos por meio do monitoramento contínuo de emissões possuem o maior nível de precisão, mas, em contrapartida, o maior custo dentre todas as alternativas.

Figura 6 – Custos relativos e a confiabilidade associada a diferentes fontes de dados ambientais



Fonte: Adaptado de Harvey *et al.* (2016)

Ainda em relação à base de dados, cabe observar que a NBR ISO 14020 (ABNT, 2002) apresenta princípios norteadores para o desenvolvimento e uso de rótulos e declarações ambientais de produtos e serviços, com informações associadas a aspectos ambientais capazes de subsidiar a tomada de decisão. Os princípios da citada norma e de outras correlatas à sua série, como a ISO 14025 (ISO, 2006), permitem o desenvolvimento de base de dados que são úteis aos estudos de ACV, inclusive com a preocupação de padronização da estrutura e do formato do dado com a finalidade de permitir o seu emprego pelos diversos tipos de ferramentas dedicadas aos estudos de ACV (*Federal Ministry for Housing, Urban Development and Building*, 2023). Contudo, para a realidade brasileira, são identificadas 32 Declarações Ambientais (DAPs) ou EPDs vigentes, do inglês *Environmental Product Declarations*, registradas pela *International EPD® System*, das quais 26 estão

ligadas ao setor de construção civil e apenas uma declaração (cimento Portland) passível de aplicação em estudos de ACV de pavimentos (Vanzolini, 2023).

Outra etapa importante da fase de ICV é a definição e a quantificação das saídas vinculadas aos fluxos estabelecidos nos estudos. Em resumo, a literatura demonstra que os estudos de ACV de pavimentos rodoviários priorizam saídas de dados em termos de emissão equivalente de CO₂ ou de gases de efeito estufa. As Tabelas 1 e 2 retratam essa situação e as diversas outras saídas identificadas nas pesquisas selecionadas. Contudo, em que pese a existência de uma certa uniformização sobre os dados de saída, os estudos de ACV de pavimentos empregam processos com distintos dados ou variáveis de entrada, a exemplo das condições funcionais e estruturais do pavimento (Xu, Akbarian, *et al.*, 2019; Yu, Lu e Xu, 2013); tipos e modelos de veículos (Wang, Lee *et al.*, 2012); estruturas do

pavimento ou tipos de superfície de rolamento (flexível ou rígido) (Han Zhang, Lepech *et al.*, 2010); e até mesmo variáveis ligadas à iluminação das rodovias pelos veículos (Santero, Masanet e Horvath, 2011), sendo essa última pouco explorada pela literatura.

Os dados de saída são empregados nas fases de avaliação de impacto do ciclo de vida e de interpretação dos resultados, fases abordadas em detalhes na seção 3.4 deste artigo. Contudo, cabe destacar que algumas pesquisas consultadas ficam limitadas à investigação das saídas e não fazem uma associação dos resultados obtidos na fase de ICV com as categorias de impacto e os seus consequentes danos ambientais (Xu, Akbarian *et al.*, 2019; Kucukvar e Tatari 2012; Tokede, Whittaker *et al.*, 2020; Han Zhang, Lepech *et al.*, 2010; Chen, Wang *et al.*, 2021).

3.4 AVALIAÇÃO DE IMPACTO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida – AICV e a interpretação dos resultados representam a terceira e quarta fases do estudo de ACV, respectivamente (Figura 3).

Segundo a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2014), a AICV visa estudar a significância dos impactos ambientais potenciais utilizando os resultados do ICV. Na etapa de AICV, os dados do inventário são associados a categorias de impacto, indicadores de categoria e a modelos de caracterização com a finalidade de compreender os efeitos ambientais vinculados a um determinado sistema. A literatura selecionada demonstrou que as categorias de impacto ambiental mais empregadas nos estudos de ACV de pavimentos estão vinculadas ao aquecimento global e à eutrofização do ar ou da água, conforme detalhado na Tabela 3. Contudo, a literatura aponta que não há um padrão referencial capaz de disciplinar o tipo de indicador ambiental e a metodologia de impacto ambiental para os estudos de ACV de pavimentos (Mattinzioli, Sol-Sanchez *et al.*, 2020). Além disso, foi identificada uma única referência que traz indicadores de sustentabilidade específicos para as diversas fases do ciclo de vida de empreendimentos rodoviários (CEN, 2016), mas com uma abordagem que engloba indicadores de impacto social e econômico, sendo que estes dois não são considerados pela NBR ISO 14040.

Tabela 3 – ACV de pavimentos: categorias de impacto ambiental e correspondentes indicadores

Referência	Categoria de Impacto	Indicador
Kunhee Choi, Lee e Mao (2016); Chen e Wang (2018); Wang, Thakkar <i>et al.</i> , (2016); Shi, Mukhopadhyay <i>et al.</i> (2019); Zheng, Easa <i>et al.</i> (2019); Yu e Lu (2014); Jullien, Dauvergne e Cerezo (2014); Han Zhang, Lepech <i>et al.</i> (2010); Tokede, Whittaker <i>et al.</i> (2020); Kucukvar e Tatari (2012); Alam, Hossain e Bazan (2022); Xu, Akbarian <i>et al.</i> (2019); Santos, Ferreira e Flintsch (2014); Shi, Mukhopadhyay <i>et al.</i> (2019)	Aquecimento Global	CO ₂ equivalente
Shi, Mukhopadhyay <i>et al.</i> (2019); Zheng, Easa <i>et al.</i> (2019); Shi, Mukhopadhyay <i>et al.</i> (2019)	Acidificação do ar atmosférico	SO ₂ equivalente
Shi, Mukhopadhyay <i>et al.</i> (2019); Zheng, Easa <i>et al.</i> (2019)	Doenças humanas respiratórias	PPM ¹
Shi, Mukhopadhyay <i>et al.</i> (2019); Zheng, Easa <i>et al.</i> (2019); Jullien, Dauvergne e Cerezo (2014); Han Zhang, Lepech <i>et al.</i> (2010); Shi, Mukhopadhyay <i>et al.</i> (2019)	Eutrofização do ar e da água	Nx equivalente
Shi, Mukhopadhyay <i>et al.</i> (2019)	Destruição da camada de ozônio.	CFC equivalente

¹ PPM: partes por milhão de partículas emitidas na atmosfera.

Fonte: Elaboração própria

Já em relação às metodologias de avaliação de impacto ambiental, as pesquisas selecionadas demonstraram que a metodologia *Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts* (TRACI) foi a mais utilizada nos estudos de ACV de pavimentos rodoviários (Tab. 1). Outras metodologias de avaliação de impacto ambiental são citadas pela literatura como as comumente empregadas nos estudos de ACV de construções, sendo oito na Europa (i. *Center of Environmental Science of Leiden University - CML*; ii. *Ecopoints ou Umweltbelastungspunkte method – “ecological scarcity”*; iii. EDIP 2003; *Environmental Footprint* (EF); iv. EN 15804 + A2 *method*; v. EPS 2015d/EPS 2015dx; vi. ILCD 2011 *Midpoint+*; vii. *Impact 2002+*; e viii. 2021 *eco-points*); uma na América do Norte (*Building for Environmental and Economic Sustainability – BEES*); e uma em nível global (ReCiPe 2016) (SIMAPRO, 2020).

A exemplo das dificuldades vinculadas à definição de unidades funcionais, seleção da fase do ciclo de vida e obtenção de dados locais, a multiplicidade de metodologias de avaliação de impacto ambiental também pode dificultar a interpretação e a análise comparativa dos resultados de ACV. O método “ReCiPe 2016”, por exemplo, atribui um grande peso às mudanças climáticas (potencial de aquecimento global), mas não considera os usos de resíduos radioativos e da água na avaliação geral dos impactos ambientais. O método “2021 *eco-points*”, por sua vez, atribui um peso um pouco menor às mudanças climáticas, mas considera o uso da água e dos resíduos radioativos em sua avaliação (FOEN, 2021). Consequentemente, um mesmo estudo de ACV poderá apresentar distintas categorias e graus de impacto ambiental a depender da metodologia de avaliação considerada.

A etapa de interpretação, por sua vez, é conceituada pela NBR ISO 14040 como a responsável pela avaliação conjunta das constatações realizadas nas fases de análise de inventário (ICV) e de avaliação de impacto (AICV), sendo destacado ainda que, nessa fase, devem ser fornecidos resultados consistentes com o objetivo e escopo previamente definidos no estudo, além das conclusões, limitações e eventuais recomendações. Para a realidade dos estudos de ACV de pavimentos rodoviários, em função das particularidades inerentes a cada estudo desenvolvido, com objetivos, escopos e condições de contorno específicas, não foi possível constatar um padrão em relação à forma de interpretação dos resultados, tampouco uma correlação entre os resultados obtidos pelos diversos pesquisadores com a finalidade de compará-los entre si, conforme já observado ao longo deste artigo. Contudo, restou evidente que parte das pesquisas empregaram modelos probabilísticos com a finalidade avaliar o nível de precisão ou de confiabilidade dos resultados e assim subsidiar a fase de interpretação dos estudos de ACV de pavimentos rodoviários. Nesse sentido, a técnica de Monte Carlo foi a mais empregada pelos pesquisadores, a exemplo do que consta nos trabalhos conduzidos por Tokede *et al.* (2020), Kucukvar e Tatari (2012) e Xu *et al.* (2019).

4 DISCUSSÃO

As pesquisas relacionadas ao emprego da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV de pavimentos rodoviários apresentaram um significativo crescimento ao longo dos últimos dez anos (Figura 1), inclusive com o desenvolvimento de políticas públicas com a finalidade de mitigar os impactos ambientais vinculados às distintas fases de seu ciclo de vida, a exemplo dos recursos orçamentários reservados pelo governo

dos EUA até o ano de 2026 para a redução dos atuais índices de emissão de gases de efeito estufa ligados às infraestruturas de transportes, e também pelos programas iniciados pela *Federal Highway Administration* – FHWA com essa mesma finalidade.

Contudo, o crescimento das pesquisas de ACV de pavimentos rodoviários demonstra que importantes questões ainda demandam uma resolução estruturada. Tendo como referência o trabalho desenvolvido no ano de 2011 por Santero, Masanet e Horvath (2011), uma das primeiras revisões da bibliografia sobre estudos de ACV de pavimentos rodoviários, pôde-se constatar que houve um tímido avanço ao longo dos últimos anos em termos de definições que auxiliem a aplicação de metodologia de ACV pelas instituições ligadas à execução e gestão das infraestruturas de transporte rodoviário. É possível constatar também que as pesquisas permanecem concentradas nos países da Europa e da América do Norte.

A revisão da literatura demonstra que os principais desafios vinculados à ACV de pavimentos rodoviários estão na definição da fronteira do sistema e de seus demais parâmetros (como tempo de vida útil e fases do ciclo de vida), obtenção de dados suficientes e aderentes à realidade local, estabelecimento de unidades funcionais que permitam a comparação dos resultados advindos de distintos estudos e ausência de padrão em relação aos indicadores ambientais e às metodologias de impacto ambiental dedicados à realidade dos pavimentos rodoviários. Associado a isso, observou-se que parte das pesquisas ficam limitadas à identificação dos gases de efeito estufa emitidos ao longo das distintas fases do ciclo de vida dos pavimentos, portanto, sem uma associação direta com os potenciais indicadores de impacto ou

prejuízos ambientais (como aquecimento global, acidificação de solo ou da água e doenças respiratórias).

A partir da expansão dos conceitos da metodologia de ACV de pavimentos entre as diversas instituições ligadas ao modo de transporte, verificou-se uma relativa falta de ferramentas ou softwares desenvolvidos especificamente para pavimentos rodoviários (seção 3.2), o que, combinado com os desafios anteriores, pode ser interpretado como o principal campo para o desenvolvimento de novas pesquisas sobre ACV no setor em questão.

É importante salientar que muitos dos estudos sobre ACV de pavimentos rodoviários têm como objetivo comparar os impactos ambientais associados à fase de construção de pavimentos rígidos e flexíveis, bem como os ganhos ambientais atribuídos ao uso de materiais alternativos na composição desses dois tipos de pavimentos. No entanto, em determinadas situações, com a infraestrutura já em funcionamento, pouco importa investigar os impactos ambientais ligados à fase de execução de uma estrutura de pavimento rígido e flexível, mas sim a estratégia de manutenção do ativo e os impactos ambientais decorrentes das decisões tomadas nessa fase. Dessa forma, os estudos de ACV de pavimentos não devem se limitar a uma única etapa de seu ciclo de vida e à simples comparação dos impactos ambientais causados pela execução de diferentes soluções de pavimentação.

Por outro lado, algumas pesquisas analisaram os impactos ambientais que estão relacionados a todas as principais fases do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários. Nesses estudos, há preponderância de emprego de dados obtidos diretamente por distintas instituições ou provenientes de bases públicas

para as fases de extração, produção e manutenção. Para as fases de operação, foram empregadas distintas metodologias de cálculo para a obtenção dos dados de saída dos sistemas, sobretudo de consumo de combustíveis e emissão de gases de efeito estufa pelos veículos em função da evolução das condições funcionais e estruturais dos pavimentos ao longo do tempo.

Quanto a esse último aspecto, constatou-se que o DNIT, por meio do Plano Nacional de Manutenção e Restauração Rodoviária – PNMRR, publica anualmente dados com as condições funcionais e estruturais dos pavimentos das rodovias federais administradas pela autarquia, inclusive com projeção de seus parâmetros para os próximos anos, o que pode subsidiar a aplicação inicial do ACV para as fases de manutenção e de operação das rodovias federais brasileiras. Além disso, sob um aspecto mais abrangente e considerando a fase de construção dos pavimentos rodoviários, constatou-se que o DNIT possui em suas referências normativas as composições de custos com os insumos necessários (como a quantidade de insumos e equipamentos com os seus respectivos fatores de consumo de combustíveis) para todos os serviços de construção e de manutenção de pavimentos rodoviários, o que também pode ser interpretado como uma importante fonte de informação para o desenvolvimento de estudo de ACV dos pavimentos executados no Brasil.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia adotada mostrou-se adequada, pois possibilitou a análise das principais pesquisas relacionadas à avaliação de impacto ambiental de pavimentos rodoviários com enfoque aos princípios e estruturas da Avaliação Ciclo de Vida – ACV das normas NBR ISO 14040

(ABNT, 2014) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014), publicadas ao longo dos últimos 12 anos na base de dados da Web of Science e em sites web de instituições públicas e privadas ligadas ao tema da pesquisa, além de possibilitar o atendimento dos demais objetivos previamente estabelecidos neste artigo. Nesse sentido, as recomendações para futuros estudos sobre ACV de pavimentos rodoviários são listados a seguir:

- i. Unidades Funcionais: estabelecer uma gama padrão de unidades funcionais que considerem as características de cada uma das fases do ciclo de vida do pavimento rodoviário e os objetivos/escopos dos estudos;
- ii. Sistema: investigar a possibilidade de padronizar os principais processos vinculados às fases do ciclo de vida de pavimentos rodoviários (com as entradas e saídas mais relevantes), a ponto de que seja possível ter uma referência em termos de processo e fronteira de sistema. Isso demanda a melhor compreensão de todas as fases do ciclo de vida dos pavimentos e dos componentes ou atividades com maiores potenciais de impacto ambiental;
- iii. Dados: criar uma base com parâmetros nacionais e regionalizados que considerem os componentes do ciclo de vida com maiores potenciais de impacto ambiental. Avaliar a possibilidade de emprego de referências normativas existentes (com dados teóricos de materiais/produtos e de emissão de GEE de equipamentos mecânicos associados a determinados itens de serviço) e aferições de campo realizadas por instituições públicas como fonte básica de informação para estudos de ACV de pavimentos rodoviários. Investigar a possibilidade de desenvolver metodologia

- que ateste a qualidade dos dados, bem como a aplicabilidade deles em função de alterações regionais e temporais;
- iv. Metodologias e indicadores de impacto ambiental: investigar a necessidade de desenvolvimento de metodologias e indicadores ambientais específicos para pavimentos rodoviários, considerando, sobretudo, as peculiaridades inerentes a cada uma das fases de seu ciclo de vida;
 - v. Interpretação dos resultados: estabelecer limites de incerteza para os resultados de ACV de pavimentos; desenvolver metodologia voltada à realização de testes de sensibilidade dos resultados em função de alterações de parâmetros de entrada; explorar o emprego de métodos estatísticos na interpretação dos resultados; e
 - vi. Ferramentas: desenvolver ferramentas que possibilitem a integração entre projetos de engenharia, dados de inventário, metodologias e indicadores de impacto ambiental específicos para pavimentos rodoviários. Investigar o emprego dos conceitos BIM (*Building Information Modeling*) nas ferramentas de ACV de pavimentos rodoviários.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14020** - Rótulos e declarações ambientais - Princípios gerais. Rio de Janeiro, p. 5. ABNT, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR ISO 14040** - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, p. 30. ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR ISO 14044** - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, p. 52. ABNT, 2014.
- ALAM, M.; HOSSAIN, K.; BAZAN, C. Life cycle analysis for asphalt pavement in Canadian context: modelling and application. **International Journal of Pavement Engineering**, 23, 3 jul. 2022. 2606-2620.
- AZARIJAFARI, H.; YAHIA, A.; BEN AMOR, M. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, 20 jan 2016. 2187-2197.
- BABASHAMSI, P. *et al.* Sustainable Development Factors in Pavement Life-Cycle: Highway/Airport Review. **Sustainability**, 2016. 139-147. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2016.04.005>.
- BRYCE, J. *et al.* Probabilistic Life-Cycle Assessment as Network-Level Evaluation Tool for Use and Maintenance Phases of Pavements. **Transportation Research Record**, 2014. 44-53.
- BUTT, A. *et al.* Life cycle assessment framework for asphalt pavements: methods to calculate and allocate energy of binder and additives. **International Journal of Pavement Engineering**, 15, 2014. 290-302.
- CEN. **Indicators for the sustainability assessment of roads**. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization. [S.l.], p. 1-35. 2016.
- CHEN, X. *et al.* Life-cycle assessment of climate change impact on time-dependent carbon-footprint of asphalt pavement. **Transportation Research Part D-Transport and Environment**, 91, feb 2021.
- CHEN, X.; WANG, H. Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect. **Journal of Cleaner Production**, 21 March 2018. 148-157. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.207>.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **PNMRR - Plano Nacional de Manutenção Rodoviária**, Brasília, 2018. ISSN 1. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/1a-semana-do-planejamento/9PNMRPlanoNacionaldeManutenoRodoviaria.pdf>. Acesso em: 4 fev. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Plano Nacional de Viação e Sistema Nacional de Viação**, Brasília, 10 dezembro 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/atlas-e-mapas/pnv-e-snv>. Acesso em: 10 dez. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **SICRO - Sistema de custos referenciais de obras**, 2022. 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/relatorio-de-parametros-de-equipamentos/parametros-de-custo-horario-dos-equipamentos-ref-jul-2022.pdf. Acesso em: 05 fev. 2023.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA. EPL. **Plano Nacional de Logística 2035 (PNL 2035)**. Brasília, p. 216. 2021. (1).

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA. EPL. **Metodologia EPL-IEMA para Emissões de GEE e Poluentes Locais**. Brasília - DF, p. 46. 2022. (1).

FEDERAL MINISTRY FOR HOUSING, URBAN DEVELOPMENT AND BUILDING. ÖKOBAUDAT - **Sustainable Construction Information Portal**, 2023. Disponível em: <https://www.oekobaudat.de/en.html>. Acesso em: 1 fev. 2023.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. FHWA. **FHWA Climate Challenge**, 04 fevereiro 2023. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/climatechallenge/projects/index.cfm>. Acesso em: 04 fev. 2023.

FEDERAL OFFICE FOR THE ENVIRONMEN. FOEN. **Swiss Eco-Factors 2021 according to the Ecological Scarcity Method. Methodological fundamentals and their application in Switzerland**. Federal Office for the Environmen. [S.l.], p. 252. 2021.

FOEN. **Swiss Eco-Factors 2021 according to the Ecological Scarcity Method. Methodological fundamentals and their application in Switzerland**. Federal Office for the Environment. [S.l.], p. 252. 2021.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão Sistemática da Literatura: conceituação, produção e publicação. **LOGEION: Filosofia da informação**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p. 57-73, set. 2020.

GHALANDARI, T. *et al.* A critical review on large-scale research prototypes and actual projects of hydronic asphalt pavement systems. **Renewable Energy**, nov. 2021. 1421-1437. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.010>.

GOVERNMENT, U., 2022. Disponível em: <https://www.congress.gov/117/bills/hr3684/BILLS-117hr3684enr.pdf>. Acesso em: 4 fev. 2023.

GUINÉE, J. B. Life Cycle Assessment: Past, Present and Future. **International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction**, 10-12 July 2012.

HAN ZHANG, P. D. *et al.* Dynamic Life-Cycle Modeling of Pavement Overlay Systems: Capturing the Impacts of Users, Construction, and Roadway Deterioration. **Journal of Infrastructure Systems**, 16, 1 dec. 2010. 1-11.

HARVEY, J. T. *et al.* **Pavement Life-Cycle Assessment Framework**. [S.l.], p. 1-246. 2016.

HU, W.; SHU, X.; HUANG, B. Sustainability innovations in transportation infrastructure: An overview of the special volume on sustainable road paving. **Journal of Cleaner Production**, 235, 19 oct 2019. 369-377.

INYIM, P. *et al.* Environmental assessment of pavement infrastructure: A systematic review. **Journal of Environmental Management**, 176, 1 jul 2016. 128-138.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO. **ISO 14025 - Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures**. International Organization for Standardization. [S.l.], p. 32. 2006.

JENSEN, A. A. *et al.* **Life Cycle Assessment: A guide to approaches, experiences and information source**, August 1997. 1-116. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/GH-07-97-595-EN-C/Issue-report-No-6.pdf/view>. Acesso em: 21 jan. 2023.

JULLIEN, A.; DAUVERGNE, M.; CERESO, V. Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA. **Transportation Research Part D-Transport and Environment**, 29, 2014. 56-65.

- KENDALL, A. **Life Cycle Assessment for Pavement: Introduction. Presentation in Minutes**. FHWA. Davis, p. 25-26. 2012.
- KUCUKVAR, M.; TATARI, O. Ecologically based hybrid life cycle analysis of continuously reinforced concrete and hot-mix asphalt pavements. **Transportation Research Part D-Transport and Environment**, 2012. 86-90.
- KUNHEE CHOI, A.; LEE, H. W.; MAO, Z. Environmental, Economic, and Social Implications of Highway Concrete Rehabilitation Alternatives. **Journal of Construction Engineering and Management**, 22 July 2016. 1-11.
- LIU, Z.; BALIEU, R.; KRINGOS, N. Integrating sustainability into pavement maintenance effectiveness evaluation: A systematic review. **Transportation Research Part D-Transport and Environment**, 104, mar 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2022.103187>.
- LOIJOS, A.; SANTERO, N.; OCHSENDORF, J. Life cycle climate impacts of the US concrete pavement network. **Resources Conservation and Recycling**, 72, Marc. 2013. 76-83.
- MARIANO, A. M.; ROCHA, M. S. **Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora**, 2017.
- MATTINZIOLI, T. *et al.* A critical review of roadway sustainable rating systems. **Sustainable Cities and Society**, p. 1-10, 11 August 2020.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. MCTIC. **Acordo de Paris**. Brasília, p. 42. 2015.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. OECD. **Understanding the value of transport infrastructure. Guidelines for macro-level measurement of spending and assets**. [S.l.], p. 46. 2013. (1).
- ORGANIZAÇÃO DAS AÇÕES UNIDAS. ONU. **2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards**. United Nations Environment Programme. Nairobi., p. 101. 2022. (978-92-807-3984-8).
- SANTERO, N. J.; MASANET, E.; HORVATH, A. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical. **Resources, Conservation and Recycling**, 27 marc. 2011. 801-809.
- SANTOS, J. *et al.* A multi-objective optimisation approach for sustainable pavement management. **Structure and Infrastructure Engineering**, 14, 2018. 854-868.
- SANTOS, J. *et al.* Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis. **Resources Conservation and Recycling**, 138, 2018. 283-397.
- SANTOS, J.; FERREIRA, A.; FLINTSCH, G. A life cycle assessment model for pavement management: road pavement construction and management in Portugal. **International Journal of Pavement Engineering**, 2014. 1-23.
- SHI, X. *et al.* Aggregate, Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, 2019. 414-425.
- SHI, X. *et al.* Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. **Journal of Cleaner Production**, 1 April 2019. 414-425.
- SIMAPRO. **SimaPro database manual - Methods library**. [S.l.], p. 1-98. 2020.
- TOKEDÉ, O. *et al.* Life cycle assessment of asphalt variants in infrastructures: The case of lignin in Australian road pavements. **Structures**, 25, 2020. 190-199.
- TOKEDÉ, O. O. *et al.* Life cycle assessment of asphalt variants in infrastructures: The case of lignin in Australian road pavements. **Structures**, p. 190-199, 2020.
- VANZOLINI, F. EPD Brasil, fevereiro 2023. Disponível em: <https://www.epdbrasil.com.br/>. Acesso em: 1 fev. 2023.
- WANG, H. *et al.* Life-cycle assessment of airport pavement design alternatives for energy and environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, 2016. 163-171.
- WANG, T. *et al.* Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance. **Journal of Cleaner Production**, 2012. 86-96.

XU, X. *et al.* Role of the use phase and pavement-vehicle interaction in comparative pavement life cycle assessment as a function of context. **Journal of Cleaner Production**, 230, 2019. 1156-1164.

YU, B.; LU, Q. Estimation of albedo effect in pavement life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, 2014. 306-309.

YU, B.; LU, Q.; XU, J. An improved pavement maintenance optimization methodology: Integrating LCA and LCCA. **Transportation Research Part A**, p. 11, 2013.

YU, B.; LU, Q.; XU, J. An improved pavement maintenance optimization methodology: Integrating LCA and LCCA. **Transportation Research Part A-Policy and Practice**, 55, 2013. 1-11.

ZHENG, X. *et al.* Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. **Journal of Cleaner Production**, 21 December 2019. 659-672.

ZHENG, X. *et al.* Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. **Journal of Cleaner Production**, 213, 10 mar 2019. 659-672. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.227>.

ANÁLISE DAS METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO E EFICIÊNCIA HIDRÁULICA DE DESCIDAS D'ÁGUA EM DEGRAUS

ASSESSMENT OF THE DIMENSIONING AND HYDRAULIC EFFICIENCY OF STEPPED SPILLWAYS

Leticia Karine Sanches Brito - leticiabrito@ste-simemp.com.br - <https://orcid.org/0000-0002-7905-5340>

Renan Ribeiro Guzzo - renan.guzzo@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0000-4914-3502>

Meiry Elizabeth dos Santos - meiry.santos@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0007-2801-8455>

Simoneli Fernandes Mendonça - simoneli.fernandes@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0003-9163-549X>

Alex de Sousa Bento - alex.bento@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0002-2342-4538>

RESUMO: As descidas d'água são definidas como dispositivos que possibilitam o escoamento das águas conduzidas pelas sarjetas, meios-fios, valetas, bueiros ou galerias, e que vertem sobre os taludes de corte ou aterros (DNIT, 2004). O dimensionamento hidráulico deste dispositivo pode ser realizado pelo método do perfil da linha d'água ou pelo método empírico (DNIT, 2006). No Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006), não existem referências para o dimensionamento de descidas em degraus. Para o dimensionamento hidráulico de estruturas em degraus foram utilizados os métodos *Skimming flow* e *Nappe flow* com base em experimentos encontrados na bibliografia. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi investigar as metodologias de dimensionamento das descidas em degraus com base no referencial publicado no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006). Verificou-se no diagnóstico que é necessário a alteração da geometria das descidas em degraus, pois as seções atuais são insuficientes de acordo com a análise hidráulica utilizando o *Skimming flow* e o *Nappe flow*. Desta forma, com base na análise realizada nesta pesquisa, destacam-se esforços necessários para revisão do Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006).

PALAVRAS-CHAVE: descidas d'água; *Skimming flow*; *Nappe flow*; drenagem de rodovias.

ABSTRACT: *Spillways are defined as devices that allow the flow of water conducted by gutters, curbs, ditches, culverts or galleries, and that spill over the cutting slopes or landfills (DNIT, 2004). The hydraulic dimensioning of this device is made by the direct step or empirical methods. The Highway Drainage Manual (DNIT, 2006) has no references for stepped spillway design. The Skimming flow and Nappe flow methods were used for the hydraulic design of step structures based on experiments found in the bibliography. This work aimed to investigate the design methodologies for stepped spillways based on the reference published in the Highway Drainage Manual (DNIT, 2006). It was verified in the diagnosis that it is necessary to change the geometry of the devices because the current sections are insufficient according to the hydraulic analysis using the Skimming flow and the Nappe flow. Thus, based on the analysis carried out in this research, efforts are needed to revise the Highway Drainage Manual (DNIT, 2006).*

KEYWORDS: stepped spillways; *Skimming flow*; *Nappe flow*; highway drainage.

1 INTRODUÇÃO

No âmbito do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) as descidas d'água são definidas como dispositivos que possibilitam o escoamento das águas conduzidas pelas sarjetas, meios-fios, valetas, bueiros ou galerias, e que vertem sobre os taludes de corte ou aterros (DNIT, 2004). Em cortes, as descidas d'água conduzem a água coletada pelas valetas ou sarjetas, quando atingem seu comprimento crítico, desaguando numa caixa coletora ou na sarjeta de corte (DNIT, 2006). Nos aterros, conduzem as águas provenientes das sarjetas ou meios-fios, quando é atingido seu comprimento crítico até os pontos baixos, desaguando no terreno natural (DNIT, 2006) ou a jusante de bueiros e galerias, quando necessário. De acordo com o Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006), a escolha das descidas d'água, entre o tipo rápido ou em degraus, depende da necessidade de dissipação de energia e da velocidade do

escoamento, parâmetros que estão relacionados à altura e declividade do talude.

No tocante ao dimensionamento hidráulico, o Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) estabelece que as descidas d'água podem ser dimensionadas pelo método do perfil da linha d'água (escoamento gradualmente variado) ou pelo método empírico.

O perfil da linha d'água pode ser computado pela metodologia do método do passo direto - *Direct Step Method* ou pelo método do passo padrão - *Standard Step Method* (Chow, 1971). Por sua vez, o método empírico consiste na determinação da largura da descida e da altura da parede do canal, com base na vazão, utilizando uma equação análoga à de um vertedor.

Um dos problemas associados ao subdimensionamento de estruturas hidráulicas em degraus é a ocorrência de erosão nas laterais e a jusante do dispositivo. Isto pode ser evidenciado por algumas ocorrências de campo (Figura 1).

Figura 1 – Erosão em descidas d'água em degraus (a) Erosão nas bordas e (b) Erosão nas bordas e a jusante



Fonte: Consórcio Skill/MPB (2019)

Para o dimensionamento hidráulico de estruturas em degraus, a literatura apresenta alguns estudos, como os experimentos realizados por Essery e Horner (1971) e Sorensen (1985) *apud* Rajaratnam (1990), aplicados em vertedouros em degraus, cujo enfoque principal caracteriza-se por avaliar o potencial de dissipação de energia

nesses dispositivos. De acordo com esses experimentos, o escoamento nesses dispositivos pode ser dividido em duas classes que estão associadas às vazões de concentração sobre eles: o escoamento *Nappe flow* (em quedas sucessivas) e o *Skimming flow* (deslizante sobre turbilhões).

O regime *Nappe flow* caracteriza-se pela formação de ressaltos nos degressos, e o *Skimming flow*, por sua vez, possui a formação de turbilhonamento (Rajaratnam, 1990). Portanto, o comportamento hidráulico destes regimes de escoamento não é representado pelas equações convencionais do regime de escoamento gradualmente variado ou pela fórmula de Manning.

O objetivo deste trabalho foi investigar as metodologias de dimensionamento das descidas d'água em degressos publicadas no Álbum de Dispositivos de Drenagem - Publicação IPR 736 (DNIT, 2018) com base no referencial publicado no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006).

Utilizou-se para simulação hidráulica o software livre SISCCOH - Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos desenvolvido em Visual Basic.NET pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG - Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos - EHR (UFMG, 2019), com base nas condições de contorno da capacidade hidráulica dos dispositivos de montante.

Neste caso, os dispositivos de montante são os modelos de meios-fios, sarjetas, valetas e bueiros funcionando como canal que estão publicados no Álbum de Dispositivos de Drenagem (DNIT, 2018) e sua Emenda 1 (DNIT, 2022).

2 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DAS DESCIDAS D'ÁGUA

Nesta seção serão descritos e analisados os métodos de dimensionamento empírico e o método do perfil da linha d'água que estão indicados no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006), bem como os métodos *Skimming flow* e *Nappe flow* apresentados na literatura

conforme mencionado anteriormente.

2.1 MÉTODO EMPÍRICO

O método empírico consiste na utilização de uma equação análoga à de um vertedor para o cálculo das dimensões da descida d'água. Para utilização do método empírico, fixa-se o valor da largura da base da descida e determina-se a altura da seção por meio da Equação 1 (DNIT, 2006):

$$Q = 2,07 \cdot L^{0,9} \cdot H^{1,6} \quad (1)$$

Onde:

Q é a vazão de projeto a ser conduzida em m³/s;

L é a largura da descida em m;

H é a altura média das paredes em m.

Para determinação da velocidade no pé da descida, no método empírico, utiliza-se a Equação 2 (DNIT, 2006):

$$V_b = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{aterro}} \quad (2)$$

Onde:

V_b é a velocidade no pé da descida em m/s;

g é a aceleração gravitacional m/s²;

h_{aterro} é a altura do aterro em m.

Com base no cálculo da velocidade no pé da descida, V_b , determina-se o dispositivo de amortecimento de energia e finaliza-se o dimensionamento.

Ao aferir as alturas de parede calculadas com base no método empírico, verifica-se que este superdimensiona as estruturas hidráulicas e apresenta uma aproximação inexata da velocidade final do escoamento, podendo afetar o dimensionamento de dissipadores de energia.

2.2 MÉTODO DO PERFIL DA LINHA D'ÁGUA

Para o segundo método preconizado pelo Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006), deve-se determinar o perfil da linha d'água, considerando o regime de escoamento gradualmente variado. A determinação do perfil da

linha d'água em canais sob o regime de escoamento gradualmente variado pode ser realizado pelo “*Standard Step Method*” - Método do Passo Padrão ou pelo “*Direct Step Method*” - Método do Passo Direto (Porto, 2006).

Primeiramente, para o cálculo com o método do passo direto, determina-se a declividade da linha de energia, Equação 3 (Ven Te Chow, 1971):

$$I_f = \left(\frac{Q \cdot n}{A \cdot R_h^{2/3}} \right)^2 \quad (3)$$

Onde:

Q é a vazão em m³/s;

I_f é a declividade da linha de energia em m/m;

n é a rugosidade de Manning adimensional;

A é a área da Seção em m²;

R_h é o raio hidráulico em m.

Com a determinação da declividade da linha de energia, verifica-se o regime de fluxo, este pode ser crítico, subcrítico ou supercrítico, a depender do número de Froude e da declividade do canal. A determinação da profundidade do regime crítico para canais retangulares é realizada pela Equação 4 (Chanson, 2004):

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot b^2}} \quad (4)$$

Onde:

y_c é a profundidade crítica em m;

Q é a vazão em m³/s;

g é a aceleração gravitacional de 9,81 m/s²;

b é a largura da descida d'água em m..

A definição da profundidade em regime normal é realizada iterativamente de modo a satisfazer a Equação 5 (Akan, 2006):

$$Q = \frac{1}{n} \cdot \frac{(b \cdot y_n)^{5/3}}{(b + 2y_n)^{2/3}} \cdot I^{1/2} \quad (5)$$

Onde:

Q é a vazão em m³/s;

y_n é a profundidade normal em m;

I é a declividade do canal em m/m;

n é a rugosidade de Manning;

b é a largura da descida, seção retangular em m.

Conforme o Manual de Drenagem (DNIT, 2006) a seção de controle do escoamento na descida d'água está na entrada d'água, logo, assume-se que a água entrará na descida, na profundidade crítica “ y_c ”. Desta forma, tem-se a configuração do perfil d'água em escoamento supercrítico, onde a variação do perfil tende a profundidade de escoamento normal “ y_n ”.

Ao analisar a metodologia discorrida neste item, não é citada a adoção de um coeficiente de rugosidade de Manning diferenciado para se considerar o dimensionamento da descida em degraus. Portanto, mesmo que se tenha a possibilidade de realizar o dimensionamento por esta metodologia, não há uma referência de parâmetros para fazê-lo.

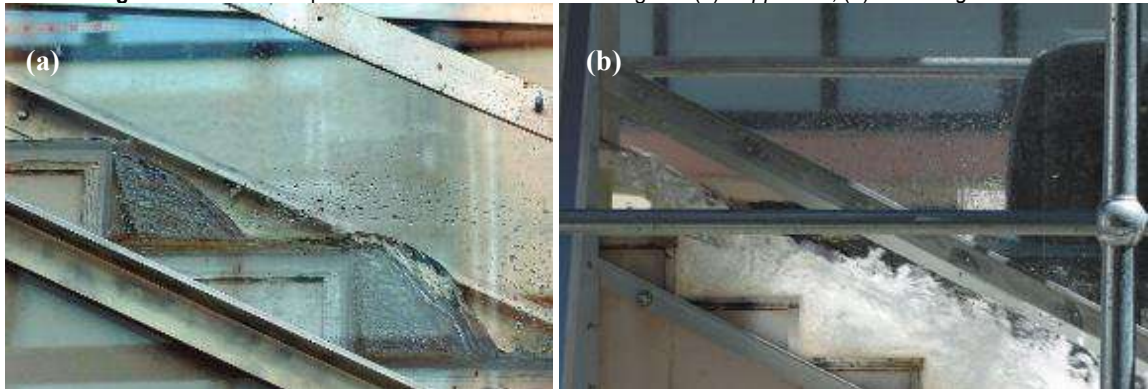
O parâmetro de rugosidade de Manning para esta metodologia pode ser obtido experimentalmente conforme ressaltado por Ghare (2005). O autor desenvolveu modelos reduzidos de descidas em degraus, onde apresentaram-se resultados de rugosidade de Manning para os degraus variando de 0,0324 a 0,0900.

Ao testar as vazões das descidas em degraus, de maneira a se obter o perfil da linha d'água considerando a rugosidade obtida experimentalmente por Ghare (2005) e a profundidade crítica como seção de controle de montante, observou-se que altas rugosidades alteram o comportamento da linha de energia, que tende a apresentar uma maior declividade. Desta forma, ao invés de uma tendência decrescente da lâmina de escoamento, partindo da profundidade crítica tendendo a profundidade normal, tem-se um resultado crescente da lâmina de escoamento.

Portanto, o comportamento do perfil da linha d'água, considerando-se uma maior rugosidade para representar o efeito dos degraus, não

representa o comportamento do escoamento em degraus, conforme pode ser visualizado nos modelos experimentais retratados na Figura 2.

Figura 2 – Modelos experimentais de escoamento em degraus (a) *Nappe flow*, (b) *Skimming flow*



Fonte: Chanson *et al.* (2015)

Com o avanço das pesquisas no âmbito do regime de escoamento em degraus, existem softwares que foram desenvolvidos com maior acurácia para determinação dos parâmetros hidráulicos necessários para o dimensionamento das descidas de água em degraus, que conforme destacado na Figura 2, apresenta a formação de turbilhões e ressalto.

Nas subseções a seguir serão descritas as metodologias *Skimming flow* e *Nappe flow*, desenvolvidas especificamente para representar o comportamento do escoamento em degraus.

2.3 METODOLOGIA SKIMMING FLOW E NAPPE FLOW

Em descidas d'água em degraus se desenvolvem duas tipologias de escoamento, a depender da vazão de projeto, da geometria do canal e dos degraus, o *Skimming flow* e o *Nappe flow* (Chanson, 2004).

No regime de escoamento *Nappe flow* (ressaltos sucessivos) o fluxo de cada degrau atinge o degrau abaixo como um jato descendente, com a dissipação de energia ocorrendo pela quebra do jato no ar, com ou sem formação de ressalto hidráulico parcial no degrau. No regime de escoamento *Skimming flow*

(turbilhão deslizante) a água desliza sobre os degraus e sua energia é amortecida pelo turbilhão recirculante preso entre os degraus. A dissipação de energia aumenta com a transferência de momento para o fluido recirculante no turbilhão (Rajaratnam, 1990).

Para diferenciar a ocorrência entre os dois tipos de escoamento, *Skimming flow* ou *Nappe flow*, calcula-se a profundidade crítica tendo-se em mãos a vazão de projeto, largura do canal, e logo após determina-se o comprimento e altura do degrau (Chanson, 2004), conforme Equações 6 e 7:

$$\frac{d_c}{h} > 1,20 - 0,325 \cdot \left(\frac{h}{l}\right) \quad (6)$$

→ *Skimming flow*

$$\frac{d_c}{h} < 0,89 - 0,4 \cdot \left(\frac{h}{l}\right) \quad (7)$$

→ *Nappe flow*, limite superior, sem ressalto

Onde:

d_c é a profundidade crítica em m;

h é a altura do degrau em m;

l é o comprimento do degrau em m.

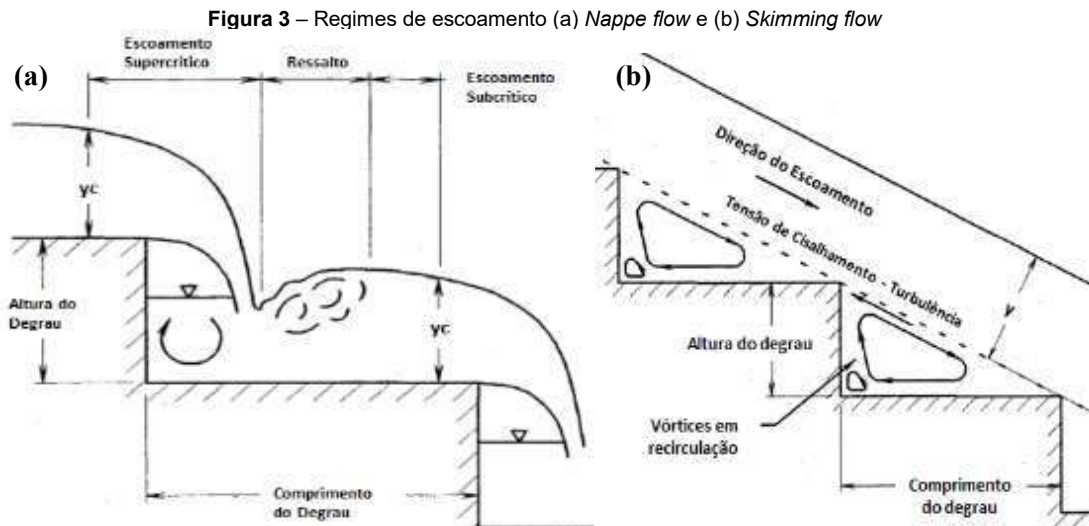
Caso o regime de escoamento não se enquadre nas condições de contorno das inequações (6) e (7), este é nomeado de regime de transição. Para evitar a formação do regime de

transição deve-se alterar os parâmetros geométricos das seções para se obter os regimes *Skimming flow* ou *Nappe flow*.

O regime de transição apresenta a formação de cavidades de ar nos degraus com efeito indesejado às estruturas hidráulicas (UFMG,

2019), além da formação de turbilhões e respingos d'água que transbordam as paredes laterais das descidas.

A ilustração do diferencial entre os dois regimes de escoamento supracitados está demonstrada na Figura 3.



Fonte: USBR (2002)

O método de cálculo do *Nappe flow* em comparação ao método *Skimming*, possui um desenvolvimento matemático simplificado. Para ambos os métodos o primeiro parâmetro de entrada é a profundidade crítica do escoamento que pode ser obtida pela Equação 8 (Chanson, 2004):

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot b}} \quad (8)$$

Onde:

d_c é a profundidade crítica do escoamento em m;
 g é aceleração gravitacional de 9,81 m/s²;
 b é a largura do canal da descida d'água em m.

O desenvolvimento do dimensionamento pelo método *Nappe flow*, requer a verificação da formação do ressalto nos degraus (Tomaz, 2019), e após prossegue-se com o cálculo da geometria do escoamento, em função da profundidade crítica e altura dos degraus.

De modo a verificar se haverá a formação do

ressalto hidráulico no regime *Nappe flow*, realiza-se as verificações contidas nas Equações 09 a 11 (Tomaz, 2019):

$$NA_1 (\text{Ressalto completo}) \rightarrow \frac{d_c}{h} \leq 0,0916 \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^{-1,276} \quad (9)$$

$$NA_2 (\text{Ressalto parcial}) \rightarrow \frac{d_c}{h} > 0,0916 \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^{-1,276} \quad (10)$$

$$NA_3 (\text{Sem ressalto}) \rightarrow \frac{d_c}{h} < 0,89 - 0,4 \left(\frac{h}{l}\right) \quad (11)$$

Onde:

d_c é a profundidade crítica em m;

h é a altura do degrau em m;

l é o comprimento do patamar do degrau em m.

A correlação obtida para descrever a ocorrência do ressalto completo foi desenvolvida por Chanson (1994) para o seguinte intervalo, conforme Equação 12:

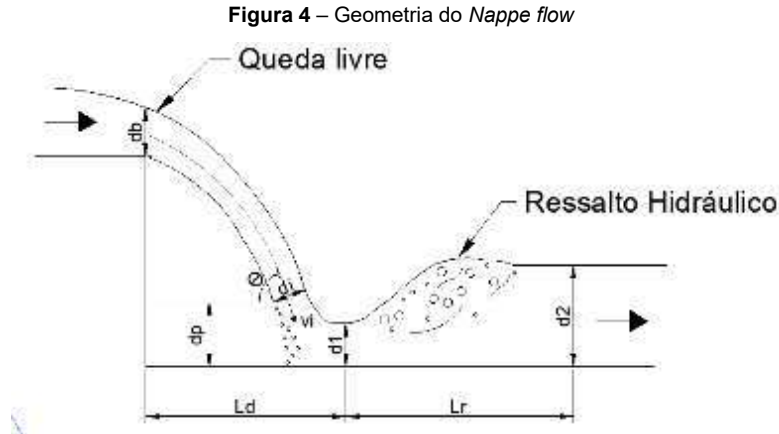
$$0,2 \leq \frac{h}{l} \leq 6 \quad (12)$$

Para verificar o limite de ocorrência do *Nappe flow*, o valor da relação da profundidade crítica

com a altura do degrau deve respeitar a condição apresentada na Equação 13 (Tomaz, 2019):

$$\frac{d_c}{h} < \frac{0,8593}{\left(\frac{h}{l} + 0,139\right)^{0,394}} \quad (13)$$

Após examinar a condição de ocorrência do *Nappe flow*, procede-se com o cálculo da geometria do escoamento *Nappe flow*, conforme a Figura 4.



Fonte: Adaptado de Chanson (1994)

Os parâmetros são calculados por meio das Equações 14 a 22 (Chason, 1994):

$$d_b = 0,715 \cdot d_c \quad (14)$$

$$\frac{d_1}{h} = 0,54 \cdot \left(\frac{d_c}{h}\right)^{1,275} \quad (15)$$

$$\frac{d_2}{h} = 1,66 \cdot \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0,81} \quad (16)$$

$$\frac{d_p}{h} = \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0,66} \quad (17)$$

$$\frac{L_d}{h} = 4,30 \cdot \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0,81} \quad (18)$$

$$\frac{d_i}{d_c} = 0,687 \cdot \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0,483} \quad (19)$$

$$\frac{V_i}{V_c} = 1,455 \cdot \left(\frac{d_c}{h}\right)^{-0,483} \quad (20)$$

$$\tan \varphi = 0,838 \cdot \left(\frac{d_c}{h}\right)^{-0,586} \quad (21)$$

$$\frac{L_r}{d_1} = 8 \cdot (Fr - 1,5) \quad (22)$$

Onde:

d_b é a profundidade do escoamento na extremidade do degrau antes da queda livre em m;

d_c é a profundidade crítica em m;

d_1 é a profundidade do início do ressalto em m;

d_2 é a profundidade do ressalto em m;

h é a altura do degrau em m;

d_p é a profundidade do escoamento na face do degrau após a queda livre em m;

L_d é o comprimento do início do ressalto em m;

d_i é a profundidade do jato em queda livre em m;

V_i é a velocidade do jato em queda livre em m/s;

V_c é a velocidade crítica em m/s;

φ é o ângulo de queda do jato em graus;

L_r é o comprimento do ressalto em m;

Fr é o número de Froude adimensional.

Os parâmetros calculados pelas Equações 14 a 22 repetem-se nas quedas sucessivas nos degraus. Para o cálculo da energia total dissipada pelo regime de escoamento *Nappe flow* utilizam-se as Equações 23 a 26 (Chamani e Rajaratnam, 1994):

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 1 - \frac{\left\{ (1 - \alpha)^N \cdot \left[1 + 1,5 \cdot \left(\frac{d_c}{h}\right) \right] + \sum_{i=1}^{N-1} (1 - \alpha)^i \right\}}{N + 1,5 \cdot \left(\frac{d_c}{h}\right)} \quad (23)$$

$$\alpha = a - b \cdot \log \left(\frac{d_c}{h} \right) \quad (24)$$

$$a = 0,30 - 0,35 \cdot \left(\frac{h}{l} \right) \quad (25)$$

$$b = 0,54 + 0,27 \cdot \left(\frac{h}{l}\right) \quad (26)$$

Onde:

ΔE é a dissipação de energia na escada hidráulica em m;

E_0 é a energia específica no pé da escada hidráulica em m;

N é o número de degraus;

α é a proporção de energia dissipada por degrau adimensional;

d_c é a profundidade crítica em m;

h é a altura do degrau em m;

a, b são os coeficientes adimensionais.

Os cálculos subsequentes para determinação do comportamento do escoamento em regime *Skimming flow* são dependentes da declividade angular do topo da descida, θ em graus, da altura do corte ou do aterro, do fator de fricção, da concentração média de ar do escoamento aerado e do comprimento de incipiência.

Para o cálculo destes parâmetros é utilizada a metodologia de Ohtsu *et al.* (2004), implementada no Sistema para Cálculo de Componentes Hidráulicos – SISCCOH da UFMG (2019), para descidas em degraus com $\theta > 19^\circ$, que são os casos dos projetos-tipo da Publicação IPR 736 (DNIT, 2018).

Após o cálculo da profundidade crítica determina-se o valor do parâmetro adimensional da relação da altura da escada com a profundidade crítica do escoamento pela Equação 27 (Ohtsu *et al.*, 2004):

$$P = \frac{H_{dam}}{d_c} \quad (27)$$

Onde:

H_{dam} é a altura da descida em degraus em m;

d_c é a profundidade crítica em m.

Logo após determina-se a altura da queda relativa para formação do escoamento quase-

uniforme, Equação 28 (Ohtsu *et al.*, 2004):

$$\frac{H_e}{d_c} = (-1,21 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^3 + 1,60 \cdot 10^{-3} \cdot \theta^2 - 7,13 \cdot 10^{-2} \cdot \theta + 1,30)^{-1} \left\{ 5,7 + 6,7 \exp\left(-6,5 \frac{S}{d_c}\right) \right\} \quad (28)$$

Onde:

H_e/d_c é a altura da queda relativa em m;

θ é o ângulo do fundo da descida em degraus em graus;

S é a altura do degrau em m;

d_c é a profundidade crítica em m.

Posteriormente é realizada a verificação da formação do escoamento quase-uniforme. Caso a altura relativa da queda seja inferior ao parâmetro da altura da descida em relação à profundidade crítica, é formado o regime de escoamento quase-uniforme, caso contrário não há a formação desse regime e prossegue-se com o cálculo por uma rota alternativa. O fluxograma das alternativas de cálculo para as condições supracitadas está disposto na Figura 5.

Para calcular o comprimento da descida d'água onde inicia o escoamento aerado (ponto de incipiência), utilizam-se as Equações 29 a 31 (Boes & Hager, 2003).

$$L_i = \frac{5,90 \cdot y_c^{\frac{6}{5}}}{\left((\sin \theta)^{\frac{7}{5}} \cdot h^{\frac{1}{5}}\right)} \quad (29)$$

$$h_{m,i} = 0,40 \cdot F^{0,6} \quad (30)$$

$$F = q/(g \sin \theta h^3)^{0,5} \quad (31)$$

Onde:

L_i é o comprimento do início da aeração em m;

y_c é a profundidade crítica em m;

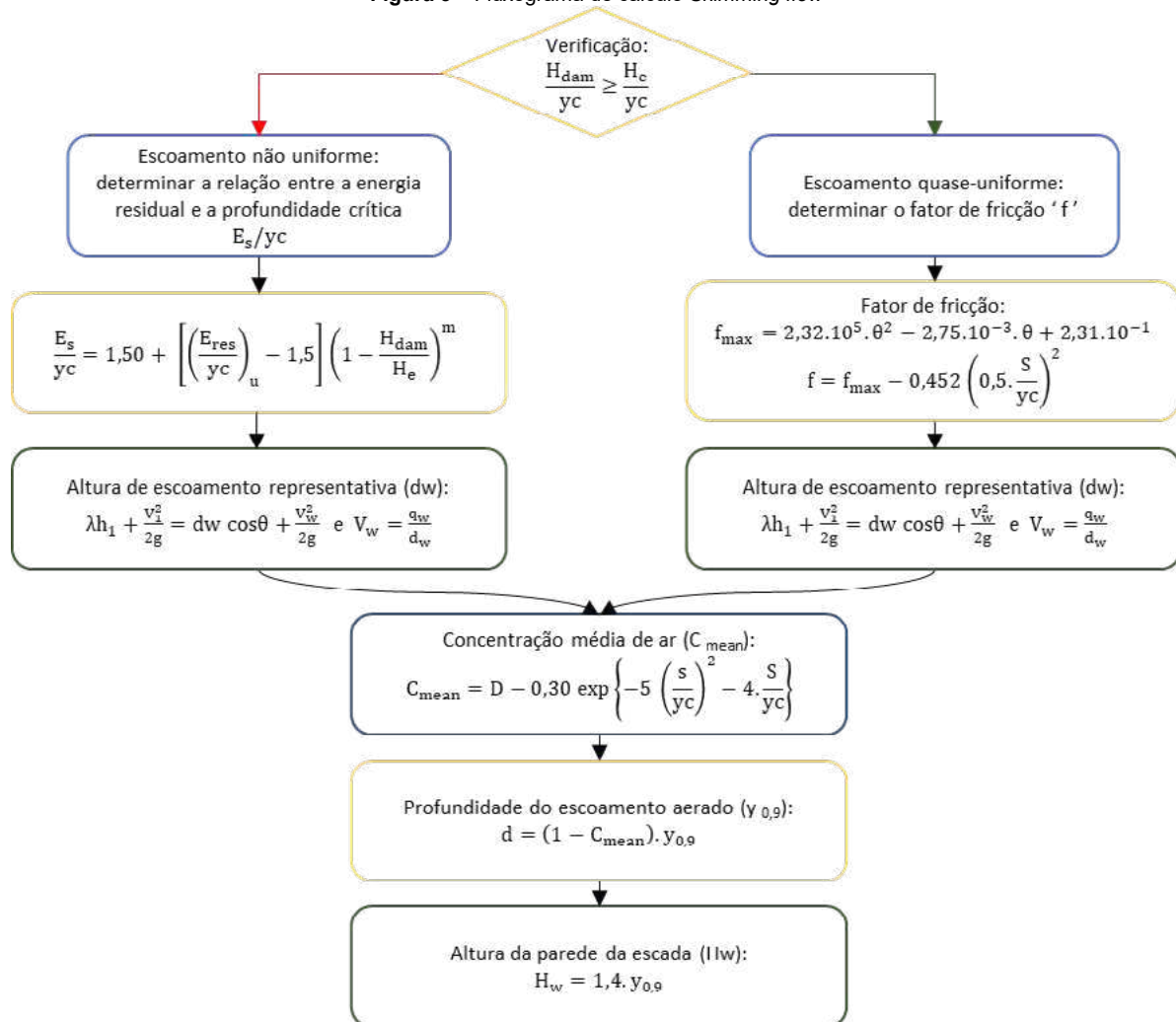
θ é a declividade angular da escada em graus;

h é a altura do degrau em m;

$h_{m,i}$ é a profundidade ar + água em m;

F é o Froude adimensional;

g é a aceleração gravitacional em m/s².

Figura 5 – Fluxograma de cálculo *Skimming flow*Fonte: Adaptado de Ohtsu *et al.* (2004)

A concentração média de ar no escoamento é dada pela Equação 32 (Ohtsu *et al.*, 2004):

$$C_{mean} = D - 0,30 \exp \left\{ -5 \left(\frac{S}{d_c} \right)^2 - 4 \left(\frac{S}{d_c} \right) \right\} \quad (32)$$

Onde:

C_{mean} é a concentração média de ar - razão adimensional;

S é a altura do degrau em m;

d_c é a profundidade crítica em m;

D é o fator em função da declividade da descida d'água.

Logo após a determinação do ponto de incipiência, da profundidade representativa do escoamento e da profundidade final do escoamento, finaliza-se o processo de dimensionamento pelo regime *Skimming flow*.

Com base na análise da metodologia, verificou-se que a altura da parede do canal é calculada com 40% de folga em relação à altura do escoamento aerado, no entanto, para adotar uma folga menos conservadora, considerou-se nos cálculos realizados nesta pesquisa uma folga de 10% em relação à profundidade do escoamento aerado.

3 VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA HIDRÁULICA DAS DESCIDAS EM DEGRAUS PELO MÉTODO *SKIMMING FLOW* E *NAPPE FLOW*

Para avaliar a eficiência hidráulica das descidas em degraus pelo método *Skimming flow* utilizou-se o *software* livre SISCCOH - Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos

desenvolvido em Visual Basic.NET pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG - Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos - EHR (UFMG, 2019), com base nas condições de contorno da capacidade hidráulica dos dispositivos de montante. Para avaliar os dispositivos sujeitos ao *regime Nappe flow* realizou-se o cálculo passo a passo, manualmente, por meio das Equações 09 a 26.

Para realização das simulações das descidas d'água em degraus, adotou-se como condições de contorno:

- 1) As vazões dos dispositivos de montante, quais sejam meios-fios, sarjetas e valetas da Emenda 1 do Álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem (DNIT, 2022); e
- 2) As vazões críticas dos bueiros funcionando como canal, conforme Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006).

Primeiramente, realizou-se a verificação do enquadramento das vazões no regime de escoamento *Skimming flow ou Nappe flow* e o diagnóstico da situação atual da geometria das descidas d'água indicadas no Álbum, Publicação IPR 736 (2018).

Calculou-se a capacidade de vazão das seções atuais publicadas no Álbum (DNIT, 2018), e comparou-se com as vazões dos dispositivos de montante de forma a verificar se o dispositivo apresenta suficiência hidráulica para condução do escoamento.

Para determinar a altura da parede da descida necessária para acomodar o escoamento em regime *Skimming flow ou Nappe flow* calculou-se a profundidade do escoamento aerado para as alturas de corte e aterro, variando de 3 a 8 metros de altura, considerando os 8 metros como altura máxima para o escalonamento do talude em conformidade ao Manual de Implantação Básica de Rodovia – Publicação IPR 742 (DNIT, 2010).

Houve o cuidado de se observar a ocorrência do escoamento aerado dentro dos comprimentos das descidas, pois, por vezes, o ponto de incipiência pode iniciar após o comprimento total da descida.

O resultado das verificações hidráulicas para as vazões das valetas de proteção de corte, adaptáveis as descidas de cortes em degraus, está disposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Verificação do regime de escoamento para as vazões das valetas de proteção de corte em revestimento vegetal

Parâmetros	VPCG 120-30	VPCG 160-30
Declividade longitudinal da valeta (m/m)	0,01	0,01
Rugosidade de Manning	0,025	0,025
Vazão de Projeto (m³/s)	0,29	0,46
Regime de Escoamento (DCD 01/02)	Transição	<i>Skimming flow</i>
Capacidade vazão (DCD 01/02) (m³/s)	0,15	0,15
Regime de Escoamento (DCD 03/04)	Transição	Transição
Capacidade vazão (DCD 03/04) (m³/s)	0,20	0,20
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,20	0,20
Altura da parede proposta (m)	0,40	0,30
Largura da base proposta (m)	0,40	0,60
Regime de escoamento seção proposta	<i>Skimming flow</i>	<i>Skimming flow</i>

Fonte: Elaboração própria

Nota-se pela Tabela 1 que para obtenção do regime de escoamento *Skimming flow* para as descidas de corte com as vazões das valetas em revestimento vegetal é necessária a alteração dos parâmetros geométricos da seção transversal.

Outrossim, verificou-se que o dispositivo publicado não possui capacidade de vazão suficiente para conduzir o escoamento contribuinte das valetas de proteção de corte em revestimento vegetal.

Para as descidas d'água adaptáveis às demonstram que também há necessidade de valetas de proteção de corte com revestimento de alteração na geometria das descidas. concreto a montante, as Tabelas 2 e 3

Tabela 2 – Verificação do regime de escoamento para as vazões das valetas de proteção de corte em revestimento de concreto - VPCC 120-30

Parâmetros	VPCC 120-30			
Declividade longitudinal da valeta (m/m)	0,01	0,02	0,03	0,04
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015	0,015
Capacidade da Valeta (m³/s)	0,49	0,69	0,84	0,97
Regime de Escoamento (DCD 01/02)	SK ^a flow	SK ^a flow	SK ^a flow	SK ^a flow
Capacidade vazão (DCD 01/02) (m³/s)	0,15	0,15	0,15	0,15
Regime de Escoamento (DCD 03/04)	Transição	SK ^a flow	SK ^a flow	SK ^a flow
Capacidade vazão (DCD 03/04) (m³/s)	0,20	0,20	0,20	0,20
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,20	0,20	0,20	0,20
Altura da parede proposta (m)	0,30	0,40	0,40	0,40
Largura da base proposta (m)	0,60	0,80	0,80	0,80
Regime de escoamento seção proposta	SK ^a flow	SK ^a flow	SK ^a flow	SK ^a flow

^a SK: *Skimming flow*

Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 – Verificação do regime de escoamento para as vazões das valetas de proteção de corte em revestimento de concreto - VPCC 160-30

Parâmetros	VPCC 160-30			
Declividade longitudinal da valeta (m/m)	0,01	0,02	0,03	0,04
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015	0,015
Capacidade da Valeta (m³/s)	0,77	1,09	1,33	1,53
Regime de Escoamento (DCD 01/02)	SK ^a flow	SK ^a flow	SK ^a flow	SK ^a flow
Capacidade vazão (DCD 01/02) (m³/s)	0,15	0,15	0,15	0,15
Regime de Escoamento (DCD 03/04)	SK ^a flow	SK ^a flow	SK ^a flow	SK ^a flow
Capacidade vazão (DCD 03/04) (m³/s)	0,20	0,20	0,20	0,20
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,20	0,20	0,20	0,20
Altura da parede proposta (m)	0,40	0,50	0,50	0,50
Largura da base proposta (m)	0,80	1,00	1,00	1,00
Regime de escoamento seção proposta	SK ^a flow	SK ^a flow	SK ^a flow	SK ^a flow

^a SK: *Skimming flow*

Fonte: Elaboração própria

Nota-se que para as vazões acima de 1 m³/s, recomenda-se a utilização de uma descida com base de 1,00 m, visto que para a descida com base de 0,80 m as alturas de parede necessárias para acomodação do fluxo são superiores as publicadas.

Ressalta-se de posse aos resultados obtidos que a altura das paredes atualmente publicada no Álbum de Dispositivos (DNIT, 2018) é insuficiente para as vazões de projeto das valetas de proteção de corte.

Para as descidas de aterro em degraus adaptáveis às sarjetas com largura total até 1 metro e aos meios-fios, existe a ocorrência do regime *Nappe flow*. Os resultados do diagnóstico

hidráulico das sarjetas STC 80-15 e STC 100-20, bem como para o meio-fio MFC 01, com alagamento temporário do acostamento, em greide contínuo e ponto baixo, estão demonstrados nas Tabelas 4 a 9.

Nessa situação, calculou-se a formação do ressalto parcial do *Nappe flow*, e a altura relativa do escoamento final considerando a fração de formação do ressalto completo como referência. Para os dispositivos onde atingiu-se o escoamento *Skimming flow* em ponto baixo, realizou-se a análise da altura do escoamento aerado. Verificou-se que, para padronização dos dispositivos adaptáveis a sarjetas e meios-fios, seria interessante a adoção de uma parede com

altura de 36 cm, que atenderia ambos os regimes adotou-se o mesmo critério de 10% em relação à profundidade do escoamento calculado.

Tabela 4 – Verificação do regime de escoamento para as vazões do meio-fio MFC 01 em greide contínuo

Parâmetros	MFC 01 – Com Alagamento – Greide Contínuo		
Declividade longitudinal da sarjeta (m/m)	0,01	0,04	0,07
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015
Capacidade da sarjeta (m³/s)	0,10	0,20	0,26
Regime de Escoamento (DAD 01/02)	NP ^a flow	NP ^a flow	Transição
Capacidade vazão (DAD 01/02) (m³/s)	0,04	0,04	0,04
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,10	0,10
Altura da parede proposta (m)	0,36	0,36	0,36
Largura da base proposta (m)	0,60	0,60	0,60
Regime de escoamento seção proposta	NP ^a flow	NP ^a flow	NP ^a flow

^a NP: *Nappe flow*

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5 – Verificação do regime de escoamento para as vazões do meio-fio MFC 01 em ponto baixo

Parâmetros	MFC 01 – Com Alagamento – Ponto Baixo		
Declividade longitudinal da sarjeta (m/m)	0,01	0,04	0,07
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015
Capacidade da sarjeta (m³/s)	0,20	0,40	0,52
Regime de Escoamento (DAD 01/02)	NP ^a flow	SK ^b flow	SK ^b flow
Capacidade vazão (DAD 01/02) (m³/s)	0,04	0,04	0,04
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,10	0,10
Altura da parede proposta (m)	0,36	0,36	0,36
Largura da base proposta (m)	0,60	0,60	0,60
Regime de escoamento seção proposta	NP ^a flow	Transição	SK ^b flow

^a NP: *Nappe flow* e ^b SK: *Skimming flow*

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6 – Verificação do regime de escoamento para as vazões da sarjeta STC 80-15 em greide contínuo

Parâmetros	STC 80-15 – Greide Contínuo		
Declividade longitudinal da sarjeta (m/m)	0,01	0,04	0,07
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015
Capacidade da sarjeta (m³/s)	0,05	0,10	0,13
Regime de Escoamento (DAD 01/02)	NP ^a flow	NP ^a flow	NP ^a flow
Capacidade vazão (DAD 01/02) (m³/s)	0,04	0,04	0,04
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,10	0,10
Altura da parede proposta (m)	0,36	0,36	0,36
Largura da base proposta (m)	0,60	0,60	0,60
Regime de escoamento seção proposta	NP ^a flow	NP ^a flow	NP ^a flow

^a NP: *Nappe flow*

Fonte: Elaboração própria

Tabela 7 – Verificação do regime de escoamento para as vazões da sarjeta STC 80-15 em ponto baixo

Parâmetros	STC 80-15 – Ponto baixo		
Declividade longitudinal da sarjeta (m/m)	0,01	0,04	0,07
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015
Capacidade da sarjeta (m³/s)	0,10	0,20	0,27
Regime de Escoamento (DAD 01/02)	NP ^a flow	NP ^a flow	Transição
Capacidade vazão (DAD 01/02) (m³/s)	0,04	0,04	0,04
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,10	0,10
Altura da parede proposta (m)	0,36	0,36	0,36
Largura da base proposta (m)	0,60	0,60	0,60
Regime de escoamento seção proposta	NP ^a flow	NP ^a flow	NP ^a flow

^a NP: *Nappe flow*

Fonte: Elaboração própria

Tabela 8 – Verificação do regime de escoamento para as vazões da sarjeta STC 100-20 em greide contínuo

Parâmetros	STC 100-20 – Greide Contínuo		
Declividade longitudinal da sarjeta (m/m)	0,01	0,04	0,07
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015
Capacidade da sarjeta (m³/s)	0,10	0,20	0,27
Regime de Escoamento (DAD 01/02)	NP ^a flow	NP ^a flow	Transição
Capacidade vazão (DAD 01/02) (m³/s)	0,04	0,04	0,04
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,10	0,10
Altura da parede proposta (m)	0,36	0,36	0,36
Largura da base proposta (m)	0,60	0,60	0,60
Regime de escoamento seção proposta	NP ^a flow	NP ^a flow	Transição

^a NP: *Nappe flow*

Fonte: Elaboração própria

Tabela 9 – Verificação do regime de escoamento para as vazões da sarjeta STC 100-20 em ponto baixo

Parâmetros	STC 100-20 – Ponto Baixo		
Declividade longitudinal da sarjeta (m/m)	0,01	0,04	0,07
Rugosidade de Manning	0,015	0,015	0,015
Capacidade da sarjeta (m³/s)	0,20	0,40	0,54
Regime de Escoamento (DAD 01/02)	NP ^a flow	SK ^b flow	SK ^b flow
Capacidade vazão (DAD 01/02) (m³/s)	0,04	0,04	0,04
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,10	0,10
Altura da parede proposta (m)	0,36	0,36	0,36
Largura da base proposta (m)	0,60	0,60	0,60
Regime de escoamento seção proposta	NP ^a flow	Transição	SK ^b flow

^a NP: *Nappe flow* e ^b SK: *Skimming flow*

Fonte: Elaboração própria

Para as descidas de aterro em degraus adaptáveis aos bueiros tubulares, os resultados das verificações hidráulicas e os diagnósticos estão dispostos nas Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 – Verificação do regime de escoamento para as vazões dos bueiros tubulares funcionando como canal - BSTC 60, BSTC 80 e BSTC 100.

Parâmetros	BSTC 60	BSTC 80	BSTC 100
Vazão Crítica (m³/s)	0,43	0,88	1,53
Descida em degraus atual	DAD 03/04	DAD 05/06	DAD 07/08
Regime de Escoamento atual	NP ^a	Transição	SK ^b flow
Capacidade de vazão da seção atual (m³/s)	0,12	0,39	1,25
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,10	0,20	0,25
Altura da parede proposta (m)	0,26	0,30	0,35
Largura da base publicada (2018) (m)	1,10	1,40	1,70
Largura da base proposta (m)	1,10	1,25	1,70
Regime de escoamento seção proposta	NP ^a	SK ^b flow	SK ^b flow

^a NP: *Nappe flow* e ^b SK: *Skimming flow*

Fonte: Elaboração própria

Tabela 11 – Verificação do regime de escoamento para as vazões dos bueiros tubulares funcionando como canal - BSTC 120, BSTC 150 e BDTC 100

Parâmetros	BSTC 120	BSTC 150	BDTC 100
Vazão Crítica (m³/s)	2,42	4,22	3,07
Descida em degraus atual	DAD 09/10	DAD 11/12	DAD 13/14
Regime de Escoamento atual	SK ^b flow	SK ^b flow	SK ^b flow
Capacidade de vazão da seção atual (m³/s)	2,35	2,90	2,80
Altura da parede publicada (2018) (m)	0,35	0,35	0,30
Altura da parede proposta (m)	0,40	0,54	0,36
Largura da base publicada (2018) (m)	2,00	2,40	2,90
Largura da base proposta (m)	2,00	2,40	2,90
Regime de escoamento seção proposta	SK ^b flow	SK ^b flow	SK ^b flow

^b SK: *Skimming flow*

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 – Verificação do regime de escoamento para as vazões dos bueiros tubulares funcionando como canal - BDTC 120 e BDTC 150

Parâmetros	BDTC 120	BDTC 150
Vazão Crítica (m³/s)	4,84	8,45
Descida em degraus atual	DAD 15/16	DAD 17/18
Capacidade de vazão da seção atual (m³/s)	4,25	6,10
Regime de Escoamento atual	SK ^b flow	SK ^b flow
Altura da parede publicada (m)	0,35	0,40
Altura da parede proposta (m)	0,45	0,55
Largura da base publicada (2018) (m)	3,40	4,10
Largura da base proposta (m)	3,40	4,10
Regime de escoamento seção proposta	SK ^b flow	SK ^b flow

^b SK: *Skimming flow*

Fonte: Elaboração própria

De acordo com as tabelas 10, 11 e 12, verificou-se a necessidade de aumentar a altura das paredes laterais das descidas d'água de aterros em degraus adaptáveis aos bueiros, em atendimento à análise hidráulica pelo regime *Skimming flow* e *Nappe flow*. Ademais, verificou-se que a capacidade hidráulica da seção atualmente no Álbum (DNIT, 2018) está aquém de atender a vazão dos bueiros funcionando como canal.

Com base nos resultados dos diagnósticos performados em relação às descidas d'água em degraus publicadas no Álbum (DNIT, 2018), verificou-se que as seções são hidráulicamente insuficientes, devendo estas serem alvo de revisão.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foram apresentadas as metodologias de dimensionamento de descidas d'água com enfoque nas descidas em degraus. Foram analisados os métodos preconizados no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) e os métodos *Skimming flow* e *Nappe flow*.

Constatou-se que o Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) não indica referências específicas para o dimensionamento de descidas em degraus, induzindo que estas sejam consideradas como estruturas hidráulicas de macrorrugosidades e sendo dimensionadas pela fórmula de Manning. No entanto, esta

aproximação pela fórmula de Manning não é recomendada para o dimensionamento de descidas em degraus (Tomaz, 2011).

O dimensionamento de descidas em degraus por uma aproximação com Manning pode acarretar subdimensionamento ou superdimensionamento a depender das condições de contorno podendo justificar problemas de erosão nas laterais e a jusante das estruturas hidráulicas.

Ao analisar a metodologia proposta pelo Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) verificou-se que o método empírico consiste na utilização de uma equação análoga à de um vertedor para o cálculo das dimensões da descida d'água, sendo esta uma aproximação grosseira ao analisar o comportamento gradualmente variado das descidas d'água tipo rápido e o comportamento dos regimes de escoamento das descidas em degraus.

Por sua vez, o método do perfil da linha d'água considera a ocorrência do regime de escoamento gradualmente variado, que descreve o comportamento hidráulico de descidas tipo rápido. No entanto, ao analisar a metodologia, não é citada a adoção de um coeficiente de rugosidade de Manning diferenciado para se considerar o dimensionamento da descida em degraus. Portanto, mesmo que se tenha a possibilidade de realizar o dimensionamento por

esta metodologia, não há uma referência de parâmetros para fazê-lo.

No entanto, ao testar o traçado do perfil da linha d'água considerando as vazões dos dispositivos, adotando-se uma rugosidade de Manning na ordem de 0,0800, observa-se que altas rugosidades alteram o comportamento da linha de energia, que tende a apresentar uma maior declividade. Dessa forma, ao invés de uma tendência decrescente da lâmina de escoamento, partindo da profundidade crítica tendendo à profundidade normal, tem-se um resultado crescente da lâmina de escoamento.

Portanto, o comportamento do perfil da linha d'água considerando-se uma maior rugosidade para representar o efeito dos degraus não representa o comportamento do escoamento em degraus.

Os experimentos que geraram as descrições do comportamento hidráulico dos regimes *Skimming flow* e *Nappe flow* tiveram um enfoque inicial no potencial de dissipação de energia de estruturas hidráulicas em degraus. De fato, o escoamento em degraus tende a reduzir as velocidades terminais ou controlar o seu aumento ao longo dos taludes.

Conforme abordado, as metodologias de cálculo dos regimes de escoamento diferenciam-se de acordo com suas características e parâmetros hidráulicos. O regime de escoamento *Skimming flow* (turbilhões deslizantes) é dependente do cálculo da declividade angular do topo da descida, da altura do corte ou do aterro, do fator de fricção, da concentração média de ar

do escoamento aerado e do comprimento de incipiência.

Por sua vez, o desenvolvimento do dimensionamento pelo método *Nappe flow*, requer a verificação da formação do ressalto nos degraus (Tomaz, 2019) e após prossegue-se com o cálculo da geometria do escoamento, em função da profundidade crítica e altura dos degraus.

Ao verificar a eficiência hidráulica das descidas em degraus publicadas no Álbum de Dispositivos (DNIT, 2018), observou-se que a geometria publicada apresenta insuficiência hidráulica para o regime *Skimming flow* e *Nappe flow*, sendo necessária a revisão destes dispositivos.

Propôs-se um aumento das alturas das paredes laterais das descidas d'água em degraus para acomodar o fluxo de maneira a evitar a ocorrência de erosões nas laterais e a jusante.

Dessa forma, com base na análise realizada nesta pesquisa, destacam-se esforços necessários para revisão da metodologia de dimensionamento de descidas d'água em degraus no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) com a inclusão das metodologias de dimensionamento dos regimes *Skimming flow* e *Nappe flow* e fomentar a utilização de modelos computacionais livres a exemplo do SISCCOH - Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos desenvolvido em Visual Basic.NET pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG - Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos - EHR (UFMG, 2019) para o desenvolvimento e análise de projetos.

REFERÊNCIAS

- AKAN, A. O. **Open Channel Hydraulics**. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann Elsevier, 2006.
- BOES, R. M. & HAGER, W. H. Two-phase flow characteristics of stepped spillways. **ASCE Journal of Hydraulic Engineering**, Virginia - USA, v. 129, n. 9, p. 661-670, set. 2003.
- CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. Jet flow on stepped spillways. **ASCE Journal of Hydraulic Engineering**, Virginia – USA, v. 120, n. 2, p. 254-259, fev. 1994.

CHANSON, H. **The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction - Basic principles, sediment motion, hydraulic modelling, design of hydraulic structures**. 2 ed. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann Elsevier, 2004.

CHANSON, H. Hydraulics of nappe flow regime above stepped chutes and spillways. **Australian Civil Engineering Transactions**, Sydney – AUD, v. CE36, n. 1, p. 69-76, 1994.

CHANSON, H.; BUNG, D. & MATOS, J. Stepped spillways and cascades. In: Chanson, H (org). **Energy Dissipation in Hydraulic Structures**. Netherlands: Taylor & Francis Group, 2015, p. 45-64.

CHOW, VEN TE. **Open-channel Hydraulics**. USA: McGraw-Hill Classic Textbook Reissue, 1971.

CONSÓRCIO SKILL/MPB ENGENHARIA. **RNC 044/LT-3.1**. Minas Gerais - MG: Skill/MPB Engenharia, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Norma DNIT 021/2004-ES - Drenagem - Entradas e descidas d'água - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Publicação IPR 724: Manual de Drenagem de Rodovias**. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Publicação IPR 742: Manual de implantação básica de rodovia**. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Publicação IPR 736: Álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem**. 5 ed. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Publicação IPR 736: Álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem – Emenda 1: Sarjetas, Valetas e Meios-fios**. Brasília, DF: IPR, 2022.

GHARE, A. D.; POREY, P. D. & INGLE, R. N. Experimental studies on frictional resistance of flow over stepped spillway. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, Maharashtra - IND, v. 11, n. 3, p. 47-56, 2005.

OHTSU, I.; YASUDA, Y. & TAKASHI, M. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. **ASCE Journal of Hydraulic Engineering**, Virginia - USA, v. 130, n. 9, p. 860 – 869, set. 2004.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4 ed. São Carlos: EESC - USP, 2006.

RAJARATNAM, N. Skimming flow in stepped spillways. **ASCE Journal of Hydraulic Engineering**, Virginia - USA, v. 116, n. 4, p. 587-591, Abril 1990.

TOMAZ, P. **Escada hidráulica em obra de pequeno porte**. Guarulhos, SP: Plínio Tomaz Engenharia, 2011.

TOMAZ, P. **Escada hidráulica Nappe Flow**. Guarulhos, SP: Plínio Tomaz Engenharia, 2019. 70 slides, color.

UNITED STATES DEPARTMENT OF INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION – USBR. **Hydraulic design of stepped spillways**. Denver, Colorado: Water Resources Research Laboratory, 2002.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG. **Sistema para Cálculo de Componentes Hidráulicos - SISCCOH**. Baptista, M. B.; Coelho M. M. L. P.; Alexandre, G. R.; Barcelos, J. M. (desenvolvedores). Belo Horizonte, MG: Pimenta d'Ávila & UFMG, 2019.

MODELO DE DETERIORAÇÃO DE ESTRUTURAS BASEADO EM CADEIAS DE MARKOV APLICADO AO BANCO DE DADOS DO DNIT

STRUCTURES DETERIORATION MODEL BASED ON MARKOV CHAINS APPLIED TO THE DNIT DATABASE

Paulo Fernando Matos de Santana - pfmsdemolay@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-6312-9931>

Breno Hvala de Figueiredo - brenofig@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0001-7357-4353>

Rafael Salles Pereira - rafasallesp@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-5749-8263>

Jorge Martins Sarkis - jmsarkis@gmail.com - <https://orcid.org/0009-0006-3100-6415>

Cintia Adriana Azevedo de Liz Anhaia - cintializ@engefoto.com.br - <https://orcid.org/0000-0003-4859-3960>

RESUMO: O Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO) do DNIT contempla, atualmente, funcionalidades de consulta, cadastro de OAEs e registro de inspeções. No contexto da gerência de estruturas, o conhecimento da taxa de deterioração e a capacidade de previsão do estado de condição futuro dos ativos auxilia na tomada de decisão quanto ao planejamento das atividades de manutenção, visando atender aos requisitos de desempenho estabelecidos pela administradora do parque de obras. Considerando a inexistência de um modelo de deterioração de estruturas implantado no SGO, este trabalho visa apresentar, de forma prática, os resultados da aplicação do modelo de deterioração baseado na teoria estocástica das Cadeias de Markov aos dados do referido sistema. Dois ciclos de inspeções foram utilizados para compor inicialmente o modelo. São apresentadas as etapas de checagem dos dados, aferição da acurácia do modelo por meio da variância do método de Markov e uma validação com base em estudos de referência na literatura. A aplicação do modelo de deterioração aos dados do DNIT apresentou bons resultados preditivos para o estado de condição do parque de obras, ainda que certos fatores afetem a acurácia do modelo. O estudo de validação apontou importantes semelhanças entre as curvas de deterioração estimadas, sobretudo com relação à idade das obras. Conclui-se, portanto, que a acurácia do modelo de deterioração tem relação direta com a dimensão do banco de dados de avaliação das estruturas, tendendo a aperfeiçoar-se conforme ocorra o enriquecimento de informações no banco de dados com novas inspeções.

PALAVRAS-CHAVE: estruturas; modelo de deterioração; cadeias de Markov; gerência de estruturas.

ABSTRACT: *The bridge management system of the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) called SGO currently includes query functionalities, structures, and inspection registration. In the context of structure management, knowing the bridge's deterioration rate and being able to predict the assets' future condition state help in decision-making regarding the maintenance activities planning, aiming to meet the agency's performance requirements. Considering the non-existence of a deterioration model implemented in the SGO, this paper aims to present, in a practical way, the application results of the deterioration model based on the stochastic theory of Markov Chains. Two cycles of inspections were used to initially compose the model. The stages of data checking, model*

accuracy measurement through the variance of the Markov method, and validation based on reference studies in the literature are presented. The application of the deterioration model to the DNIT database showed good predictive results for the bridge's stock condition state, even though certain factors affect the model's accuracy. The validation study pointed out important similarities between the estimated deterioration curves, especially concerning the age of the structures. It is concluded, therefore, that the accuracy of the deterioration model is directly related to the size of the database for evaluating structures, tending to improve as new inspection data arrive.

KEYWORDS: structures; deterioration model; Markov chains; structures management.

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento de Obras de Arte Especiais (OAEs) é um processo abrangente que associa atividades de planejamento, inspeção, avaliação e manutenção de estruturas aos recursos anuais disponíveis e objetivos a longo prazo para manter e ampliar o parque de obras existente, considerando, ainda, as necessidades dos usuários (Austroads, 2018).

Um sistema de gerenciamento de estruturas é, portanto, uma ferramenta computacional que auxilia a coleta e o armazenamento de dados (inventário e avaliação), dotada de funcionalidades analíticas e de apoio à tomada de decisão. Com esta ferramenta, um gestor pode realizar análises técnicas de priorização das atividades de manutenção, ampliação e reconstrução de estruturas de forma sistemática e, sempre que possível, automatizada.

No âmbito do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em 1993 foi desenvolvido o Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO). Nos anos subsequentes, foram registradas as inspeções e avaliações de 1.000 OAEs localizadas em importantes rodovias federais do Brasil. Atualizações posteriores no sistema gerenciador de banco de dados, linguagem de programação, recursos de multimídia e geoprocessamento tornaram o SGO uma ferramenta ágil e prática para o cadastro de estruturas, inspeções e

consultas de natureza técnica e gerencial (Melo *et al.*, 2004).

Segundo Woodward *et al.* (2001), os principais objetivos do gerenciamento de Obras de Arte Especiais são: garantir a segurança de todos os usuários da rede viária e de terceiros; assegurar um determinado nível de serviço para cada estrutura; e assegurar a conservação do patrimônio a longo prazo. A garantia da segurança é obtida por meio do planejamento otimizado das atividades de manutenção. Assegurar um determinado nível de serviço para um parque de obras e a conservação deste patrimônio a longo prazo envolve o conhecimento dos fatores que influenciam no processo de deterioração dos materiais constituintes das obras.

Entende-se por deterioração em estruturas o processo de degradação dos materiais de construção, medido por indicadores que comparam as condições atuais da estrutura com os seus requisitos de funcionamento, determinados pelo órgão administrador. No caso do DNIT, as premissas para a atribuição da Nota Técnica, principal indicador de estado de condição das estruturas nas inspeções, são dispostas na Norma DNIT 010-PRO (2004).

O decaimento do estado de condição de uma estrutura ao longo do tempo pode ocorrer devido à ação do tráfego e/ou do meio ambiente, assim como por mudanças físicas e/ou químicas nas

propriedades mecânicas dos componentes da estrutura. Desse modo, o conhecimento das taxas de deterioração e a previsão de estados futuros podem fornecer subsídios fundamentais para a tomada de decisão dos gestores de obras de infraestrutura de transportes.

Na gestão desses ativos, saber quando programar as intervenções que serão necessárias no futuro depende da habilidade em prever tais ações. Essa estimativa pode ser baseada no conhecimento empírico e na experiência de profissionais da área ou em modelos matemáticos de deterioração de estruturas. Evidentemente, os modelos matemáticos se destacam, uma vez que suas rotinas podem ser sistematizadas e teorias matemáticas são capazes de lidar com características aleatórias e temporais com maior precisão, se comparados à capacidade de generalização advinda da experiência de trabalho de um profissional.

O uso de dados experimentais é a característica principal dos modelos de deterioração de estruturas de natureza empírica, enquanto modelos mecanicistas são desenvolvidos a partir de teorias matemáticas (Oliveira, 2019). Dentre esses, classificam-se em determinísticos, estocásticos e de inteligência artificial (Setunge; Hasan, 2011).

Os modelos determinísticos se utilizam de teorias estatísticas como a regressão, ou mínimos quadrados, que procuram descrever tendências a partir de dados históricos do inventário de obras. Dentre os modelos de regressão, a aproximação linear é a mais simples. No entanto, a depender do comportamento das variáveis do problema, o modelo pode não apresentar extrapolações acuradas. As regressões não lineares, como polinomial, exponencial e logarítmica, podem apresentar resultados mais aderentes se

comparadas às saídas do modelo de regressão linear.

Por outro lado, segundo Oliveira (2019), os modelos estocásticos, ou probabilísticos, são alimentados com variáveis randômicas de entrada, atribuindo-se probabilidades da ocorrência de determinado estado de condição no universo amostral. A autora destaca ainda que os modelos probabilísticos produzem uma previsão futura do índice de condição das estruturas que melhor representa as incertezas inerentes aos processos de deterioração, sendo esta a principal causa da prevalência da sua adoção nos sistemas de gerenciamento de OAEs, em detrimento do uso de modelos determinísticos. Outras metodologias utilizam processos de inteligência artificial (algoritmos genéticos, redes neurais, entre outros).

No conjunto de modelos estocásticos, destacam-se as Cadeias de Markov, pela sua utilização na implantação de modelos de deterioração de estruturas em *softwares* de gerenciamento de OAEs na América do Norte e Europa, como *AASHTOWare (Pontis)*, *Bridgit*, *Ontario Bridge Management System (OBMS)* e *GOA*, respectivamente, em decorrência dos bons resultados na sua aplicação (Golabi e Shephard, 1997; Elbehairy, 2007).

Sendo assim, considerando a inexistência de um modelo de deterioração de estruturas implantado no SGO que viabilize análises preditivas acerca do estado de condição futuro do parque de obras do DNIT, este trabalho visa apresentar, com base em registros de inspeções do SGO, a estruturação necessária aos dados de entrada, aplicação e resultados do modelo de deterioração, baseado na teoria estocástica das Cadeias de Markov. As curvas de deterioração são analisadas à luz de pesquisas correlatas ao tema, de modo a validar a proposição de

utilização de um modelo probabilístico no estudo em questão.

2 METODOLOGIA

Os registros de inspeções cadastrais e rotineiras de um universo de 6.833 OAEs cadastradas no SGO foram extraídos do banco de dados para o preparo e posterior seleção da amostra a ser analisada. As inspeções selecionadas fizeram parte dos dois últimos ciclos de inspeções do DNIT, ocorridos entre os anos de 2018 e 2021, devido à regularidade dos dados de avaliação quando comparados aos dados de anos anteriores.

O modelo de deterioração baseado nas Cadeias de Markov leva em consideração as contagens de transições de estado ocorridas anualmente em todas as OAEs do parque e dentro do período de análise definido. Portanto, a primeira etapa do trabalho consistiu na obtenção dos dados de entrada para o modelo, que correspondem às Notas Técnicas das OAEs por ano, de 2018 a 2021.

Como os ciclos de inspeções são realizados segundo as diretrizes da Norma DNIT 010-PRO (2004), que especifica o intervalo de realização das inspeções rotineiras para cada dois anos, são identificados os anos em que uma dada OAE não teve um registro atribuído no SGO, ou seja, nos períodos entre ciclos.

Após a organização das notas por ano, realizou-se uma etapa de estruturação desses dados por meio de uma rotina de preenchimento dos dados faltantes, de acordo com regras pré-estabelecidas. Em seguida, procedeu-se à etapa de seleção da amostra e aplicação da metodologia para obtenção das curvas de deterioração, bem como a geração de cenários futuros para prever o estado de condição do parque de obras, caso não haja intervenção, ou seja, se as estruturas não receberem atividades

de manutenção, o que permitiria o avanço dos processos de deterioração ao longo dos anos.

Dessa maneira, a checagem dos dados de previsão se dá em duas etapas. A primeira etapa consiste na comparação entre os dados previstos e observados para o último ano do período de análise, semelhante à metodologia adotada por Oliveira (2019). A segunda etapa, também como forma de verificar a acurácia do modelo, consiste na comparação das curvas de deterioração obtidas com outras curvas estabelecidas em estudos de referência na literatura internacional.

2.1 CADEIAS DE MARKOV

Os processos de Markov são processos estocásticos, isto é, caracterizam o comportamento de um sistema no tempo sob determinadas condições probabilísticas (Almeida, 2013). Com relação à variável tempo, os processos de Markov podem se caracterizar como discretos, sendo $X(t); t = 0, 1, 2, \dots$, ou contínuos, sendo $X(t); t > 0$.

Apesar de a deterioração em estruturas possuir um caráter contínuo, a utilização dos índices de condição como dados discretos é um procedimento largamente utilizado para mensurar a condição da estrutura ao longo dos anos, reduzindo a complexidade da monitoração contínua desse processo (Madanat *et al.*, 1995).

Morcous (2006) acrescenta que a técnica das Cadeias de Markov é capaz de mensurar a dependência com o tempo e a incerteza dos processos de deterioração das estruturas, além da sua fácil implementação computacional e simplicidade de uso nos sistemas de gerenciamento de OAEs

Segundo Oliveira (2019), as Cadeias de Markov são aplicadas para deterioração de pontes rodoviárias, considerando o conceito de dano cumulativo e probabilístico, no qual é esperado o decréscimo da Nota Técnica dos

elementos após vários períodos de transição. Elas são ditas de primeira ordem quando consideram que o estado futuro de um elemento estrutural depende apenas do seu estado atual, sob a hipótese que os estados no futuro e no passado são independentes.

Apesar das vantagens na aplicação do método, existem limitações intrínsecas à teoria das Cadeias de Markov, a citar: dificuldade em incorporar múltiplos fatores relevantes que impactam no processo de deterioração, tais como clima, tráfego, tipo de rota e propriedades dos materiais; inaptidão para prever o desempenho de estruturas que passaram por atividades de reparo ou manutenção; e característica estacionária, prevendo que a probabilidade de transição entre estados será constante ao longo do tempo (Wu *et al.*, 2017).

As probabilidades de uma OAE transitar de estado são representadas por uma matriz ($n \times n$), sendo " n " a quantidade de estados de condição possíveis. Essa matriz é denominada Matriz de Probabilidade de Transições (MPT). Por ser oriunda de um processo estacionário, a MPT é constante para qualquer tempo, sendo a mesma utilizada entre $t = 0$ e $t = 1$ ou entre $t = 9$ e $t = 10$. As probabilidades de um elemento transitar do estado " i " no instante inicial t para um estado " j " num dado instante $t + \Delta t$ e de um elemento permanecer no mesmo estado " i " são dadas pelas Equações 1 e 2, respectivamente, a seguir. A estrutura da MPT é descrita na Equação 3, na sequência.

$$P_{(\Delta t)ij} = P_r(X_{t+\Delta t} = j \mid X_t = i) \quad (1)$$

$$P_{(\Delta t)ij} = P_r(X_{t+\Delta t} = i \mid X_t = i) \quad (2)$$

$$P = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Cada elemento p_{ij} da matriz representa a probabilidade de a Nota Técnica passar do estado " i " para o estado " j " durante um determinado intervalo de tempo Δt . A matriz de probabilidade de Markov possui propriedades que devem ser consideradas para a aplicação nos modelos de deterioração de estruturas, a saber:

- $0 \leq p_{ij} \leq 1$; com $i, j = 1, 2, \dots, n$; e
- $\sum_j^n p_{ij} = 1$; com $i = 1, 2, \dots, n$.

A primeira propriedade observa que a probabilidade de transição é um valor decimal que varia de 0 a 1. Já a segunda propriedade exige que o somatório de todas as probabilidades para uma mesma linha da MPT deve ser igual a 1. O modelo da matriz é triangular inferior, ou seja, os elementos acima da diagonal principal são iguais a zero, representando a exclusão dos casos de transições positivas entre notas (que podem indicar ações de melhoramento ou de manutenção na estrutura).

Para a construção de uma MPT, o banco de dados disponível com o inventário e a avaliação das obras é tratado com o objetivo específico para cada estudo. Em pequenos bancos de dados, a probabilidade pode ser calculada seguindo a abordagem de frequência (Jiang, 1990). Sendo p_{ij} a probabilidade de transição da estrutura passar do estado " i " para o estado " j ", n_{ij} o número de transições ocorridas e n_i o total de estruturas no estado " i " antes da deterioração, então tem-se o cálculo da estimativa por meio da Equação 4:

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (4)$$

A aplicação da metodologia, portanto, permite basicamente a saída de dois tipos de informações: a previsão em nível gerencial do estado de condição de um parque de obras e a previsão do valor esperado de um dado estado de condição após passados t anos. Sendo $N(t)$ e N_0 os vetores que representam a contagem de obras

para cada estado de condição no tempo t e no ano inicial de análise, respectivamente, o cálculo da previsão do estado de condição para um parque de obras é determinado por meio da Equação 5.

$$N(t) = N_0 \times MPT^t \quad (5)$$

Para estimar o valor esperado de um dado estado de condição para um horizonte de t anos, parte-se: do vetor de estado atual E_{c0} , concebido

conforme a Tabela 1, a seguir; da MPT correspondente ao período decorrido entre o estado atual e o previsto; e, por fim, do vetor de estados de condição possíveis E_{cp} , também apresentado na Tabela 1. O cálculo vetorial que determina o valor esperado $E(t)$ é mostrado na Equação 6, a seguir.

$$E(t) = E_{c0} \cdot (MPT)^t \cdot E_{cp} \quad (6)$$

Tabela 1 – Vetores de estado utilizados no cálculo do valor esperado $E(t)$

E_{cp}	E_{c0}
1	1 0 0 0 0
2	0 1 0 0 0
3	0 0 1 0 0
4	0 0 0 1 0
5	0 0 0 0 1

Fonte: Elaboração própria

2.2 ESTRUTURAÇÃO DOS DADOS

Da base de dados do SGO, foi selecionada uma amostra contendo 6.383 OAEs. Foram excluídas as pontes de madeira, pontilhões, OAEs inservíveis, túneis e passagens de pedestres. Cada uma dessas estruturas possui diferentes processos de deterioração que devem ser analisados separadamente do parque de obras, ou que não devem fazer parte da análise de deterioração do parque de obras em serviço (Almeida, 2013).

Após a seleção da amostra, procedeu-se com a organização dos dados de avaliação das estruturas por ano, de 2018 a 2021. Em seguida, foi necessária a estruturação desses dados mediante rotina de preenchimento dos dados faltantes nos anos entre ciclos de inspeções, uma vez que as transições entre estados de condição são contabilizadas anualmente. As respectivas etapas de organização e estruturação dos dados com preenchimento das notas faltantes é mostrada a seguir, para uma situação hipotética, na Tabela 2.

Tabela 2 – Estruturação dos dados de avaliação faltantes nos anos entre ciclos de inspeções

OAE	ANTES				DEPOIS			
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
1		4		4	4	4	4	4
2		3		3	3	3	3	3
3		4		1	4	4	2	1
4				4			4	4
5	5	4	4		5	4	4	4
6		1	4		1	1	4	4
7	5		3		5	4	3	3
8		5		4	5	5	4	4

Fonte: Elaboração própria

A rotina de preenchimento dos dados considerou cinco regras pré-estabelecidas para a conjectura das notas em cada ano do período

base (2018-2021). Nesse sentido, são tomadas as ações correspondentes de modo a utilizar, sempre que possível, os dados de avaliação

registrados no SGO. Além disso, o processo de preenchimento inicia-se no primeiro ano do intervalo, para cada OAE, procedendo da mesma forma até o último ano do período base. Os cinco regramentos da rotina são:

- **Caso 1:** Ter a nota no ano;
- **Caso 2:** Não ter a nota no ano (**E**) Não ter a nota no(s) ano(s) vizinho(s);
- **Caso 3:** Não ter a nota no ano (**E**) Ter a nota nos anos vizinhos;
- **Caso 4:** Não ter a nota no ano (**E**) Ter a nota

no ano posterior; e

- **Caso 5:** Não ter a nota no ano (**E**) Ter a nota no ano anterior.

Uma vez realizado o preenchimento das notas faltantes, são contabilizadas as transições entre os estados de condição, inclusive os casos de manutenção da Nota Técnica. A Tabela 3, a seguir, apresenta um resumo de todas as contagens de transições consideradas no período base e para todas as OAEs da amostra.

Tabela 3 – Contagem de transições após estruturação dos dados

5-5	5-4	5-3	5-2	5-1	4-4	4-3	4-2	4-1	3-3	3-2	3-1	2-2	2-1	1-1
66	77	3	0	0	8.640	308	16	2	4.861	124	8	1.898	63	369

Total de transições: 16.435

Fonte: Elaboração própria

Observa-se que somente os registros de decaimento e permanência da Nota Técnica foram considerados na contagem de transições. Desse modo, desconsideram-se os casos de melhoramento do estado de condição.

3 RESULTADOS

Como resultado do processo de contagem das transições entre Notas Técnicas das OAEs no período definido, têm-se nas Equações 7 e 8, a seguir, as matrizes de contagem e de probabilidade de transições para um período de um ano, esta última obtida conforme a Equação 4, apresentada anteriormente.

$$MCT = \begin{bmatrix} 369 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 63 & 1898 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 124 & 4861 & 0 & 0 \\ 2 & 16 & 308 & 8640 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 77 & 66 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$MPT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0321 & 0,9679 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0016 & 0,0248 & 0,9736 & 0 & 0 \\ 0,0002 & 0,0018 & 0,0344 & 0,9636 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0205 & 0,5274 & 0,4521 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Da MPT apresentada na Equação 8, observa-se que uma OAE Nota 5, em um determinado ano, tem uma probabilidade igual a 45,21% de permanecer na mesma nota no ano seguinte, enquanto a probabilidade de ter sua nota degradada para a Nota 4 no ano seguinte é igual a 52,74%. Com base nos dados inseridos no modelo, essa mesma OAE tem, ainda, uma probabilidade igual a 2,05% de transitar da Nota 5 para a Nota 3 no intervalo de 1 ano. Similarmente, são inferidas as probabilidades para os demais estados de condição.

Dado um horizonte de 50 anos para uma análise de deterioração do parque de obras e obtidas as MPTs correspondentes para este período, determina-se, com base na Equação 6, os valores esperados para cada estado de condição ao longo dos anos. A Tabela 4, a seguir, apresenta a previsão da Nota Técnica para o período de 50 anos.

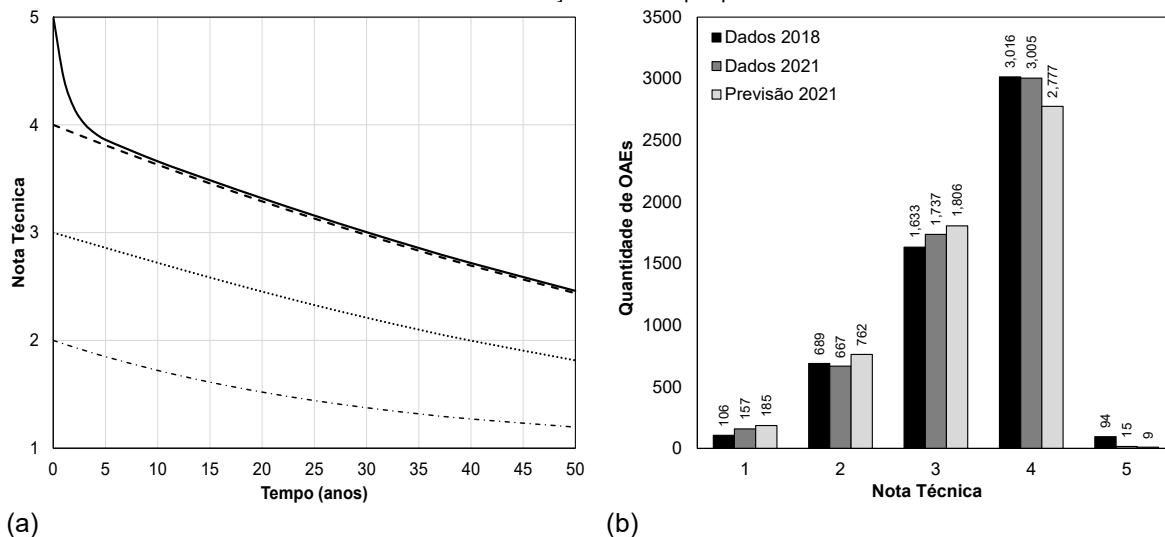
Tabela 4 – Valores esperados para as Notas Técnicas ao longo dos anos

<i>t</i> (em anos)	2	3	4	5
0	2	3	4	5
1	1,97	2,97	3,96	4,43
2	1,94	2,94	3,92	4,15
3	1,91	2,92	3,89	4,01
4	1,88	2,89	3,85	3,92
5	1,85	2,86	3,81	3,86
10	1,72	2,72	3,63	3,66
15	1,61	2,58	3,46	3,49
20	1,52	2,45	3,29	3,32
25	1,44	2,33	3,13	3,16
30	1,38	2,21	2,98	3,00
35	1,32	2,10	2,83	2,86
40	1,27	2,00	2,69	2,72
50	1,20	1,81	2,44	2,46

Fonte: Elaboração própria

Assim, tem-se a construção das curvas de deterioração por Nota Técnica, considerando o grupo de 6.383 OAEs analisadas no período entre 2018 e 2021. Além dos resultados em termos de curvas do comportamento da Nota Técnica em função do tempo, outra saída do modelo é a previsão do estado de condição do parque de obras para a hipótese de não haver intervenções nas estruturas.

A Figura 1, a seguir, apresenta as curvas de deterioração obtidas por meio das Cadeias de Markov e a comparação entre as quantidades de OAEs, em função da Nota Técnica, nos anos inicial e final do período base. As quantidades previstas são comparadas àquelas obtidas após a etapa de estruturação dos dados, exposta anteriormente, no item 2.2.

Figura 1 – Saídas do modelo de deterioração para a amostra contendo 6.383 OAEs: (a) Curvas de deterioração; (b) Previsão do estado de condição futuro do parque de obras

Fonte: Elaboração própria

Nesta análise (Figura 1b), partiu-se da distribuição de frequência de obras em cada estado de condição no ano de 2018 e realizou-se

a previsão para o ano de 2021. De acordo com Oliveira (2019), a mensuração da acurácia do modelo somente a partir da comparação dos

dados previstos com os dados observados, ou reais, não é obtida de forma direta. Desse modo, por meio do cálculo da variância do método de Markov tal como proposto pela autora, conforme a Equação 9, a seguir, tem-se então a verificação

da acurácia do modelo de previsão, conforme mostrado na Tabela 5, logo após.

$$Var(N_t) = N_0 \times [(MPT)^t \cdot (1 - (MPT)^t)] \quad (9)$$

Tabela 5 – Resultados das previsões de número de pontes por Nota Técnica e do cálculo da variância do método de Markov para as OAEs estudadas

Ano	Número de OAEs por Nota Técnica				
	1	2	3	4	5
Dados 2018	106	689	1.633	3.016	94
Dados 2021	157	667	1.737	3.005	15
Previsão 2021	185	762	1.806	2.777	9
Variância	73	188	386	297	8

Fonte: Elaboração própria

3.1 VALIDAÇÃO COM ESTUDOS DE REFERÊNCIA

Com o objetivo de comparar e validar a proposta de utilização do modelo de deterioração de estruturas, baseado nas Cadeias de Markov, como ferramenta matemática para a previsão do estado de condição futuro do parque de obras do DNIT, foram realizadas buscas na literatura por estudos que tenham utilizado a mesma metodologia e aplicação a um banco de dados de avaliação de OAEs.

Um dos estudos consultados para tal comparação foi realizado por Almeida (2013), o qual foi um estudo de referência para o desenvolvimento da fundamentação técnica e científica do Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais de Portugal, nomeado como GOA. Dentre os diversos estudos relacionados pela autora que mencionam a aplicação de modelos de deterioração em sistemas de gerenciamento de estruturas, foi selecionado o trabalho de Devaraj (2009) para o estudo de validação da metodologia proposta.

Dinesh Devaraj utilizou dados coletados de uma base de dados com 4.400 pontes (não apenas de concreto armado) no estado norte-americano de Michigan. O modelo desenvolvido teve como objetivo propor uma estimativa da

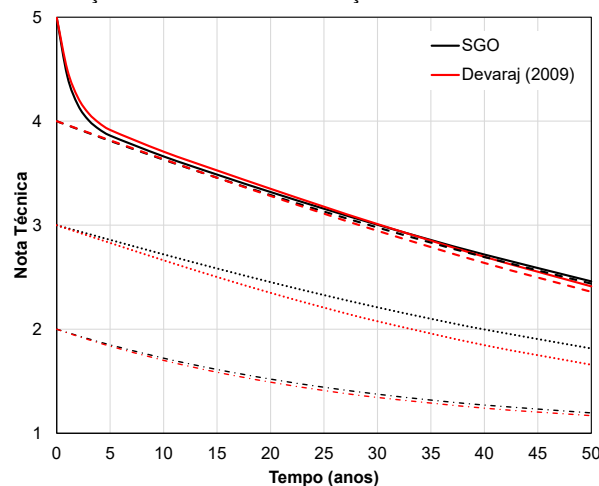
degradação com base em matrizes de Markov não-homogêneas, diferenciadas por grupos distintos de idade das obras. A escala de avaliação de OAEs indicada pela *Federal Highway Administration* (FHWA) e utilizada no estudo de Devaraj (2009) contém sete níveis e, por esse motivo, Almeida (2013) realizou uma transformação nos dados do autor de modo a trabalhar com uma matriz de cinco níveis, semelhante àqueles utilizados na ABNT NBR 9452 (2019) e na Norma DNIT 010-PRO (2004). As matrizes propostas pelo autor dividem o universo de obras em três grupos selecionados com base na idade das obras: com até 20 anos; de 20 a 40 anos; e com 41 ou mais anos.

Tem-se que até a década de 80 houve uma rápida e expressiva ampliação da malha rodoviária no Brasil, dando origem, por consequência, à construção de muitas obras de arte especiais. Após esse período, o país teve uma redução na expansão da malha rodoviária, com novas OAEs surgindo em virtude da duplicação de trechos já existentes, além da implantação de algumas novas rodovias. De acordo com o banco de dados do SGO, a maior parte das OAEs em rodovias federais brasileiras possuem idade superior a 40 anos (63,40% de um total de 4.112 obras com idade registrada).

Sendo assim, a Figura 2, a seguir, apresenta a compilação das curvas de deterioração obtidas com os dados de avaliação das 6.383 OAEs do SGO e as curvas extraídas do estudo de Devaraj (2009) para a classe de obras com idade superior a 40 anos. Na sequência, a Figura 3 apresenta as curvas de deterioração obtidas com os dados do SGO e as curvas respectivas a cada grupo de faixa etária presentes no estudo de Devaraj (2009). Observa-se, de fato, uma maior semelhança entre as curvas das OAEs com idade superior a 40 anos e as curvas de deterioração para esta mesma faixa etária apresentadas por Devaraj (2009).

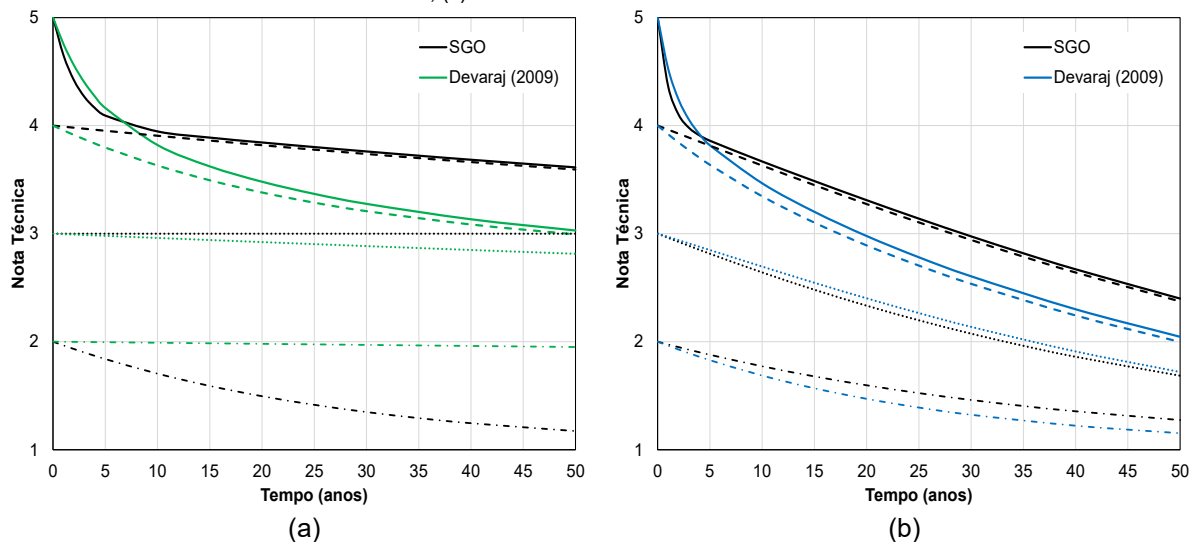
Similar à estratégia utilizada por Almeida (2013), de avaliar modelos de deterioração disponíveis na literatura e/ou já empregados em outros países para compor o modelo a ser implementado no sistema de gerenciamento de pontes em Portugal, esta etapa de validação das curvas obtidas com os dados do DNIT e o estudo de Devaraj (2009) se faz importante para que seja possível, a partir de uma curva existente tratada estatisticamente com uma amostra robusta, conseguir corrigir alguns possíveis erros nas curvas geradas no futuro, com a contínua chegada de dados de inspeções nas OAEs do parque de obras sob administração do DNIT.

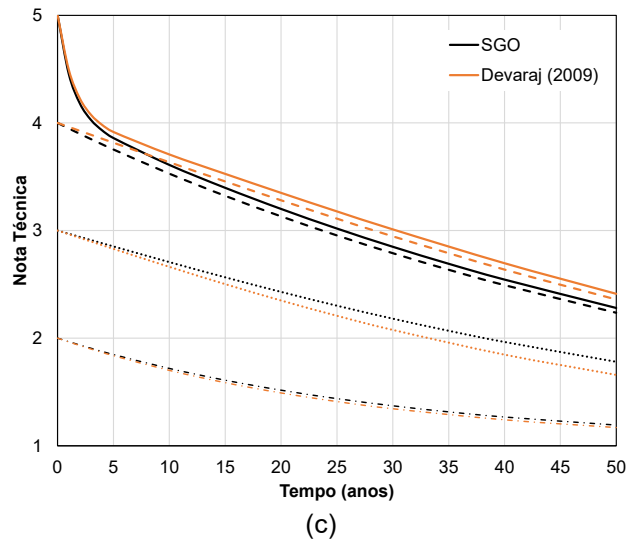
Figura 2 – Validação das curvas de deterioração com o estudo de Devaraj (2009)



Fonte: Elaboração própria

Figura 3 – Curvas de deterioração por grupo de OAEs: (a) OAEs com até 20 anos de idade; (b) OAEs com idade entre 20 e 40 anos; (c) OAEs com 41 ou mais anos de idade





Fonte: Elaboração própria

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta, de forma prática, os resultados da aplicação de um modelo de deterioração de estruturas, baseado na teoria estocástica das Cadeias de Markov, aos dados provenientes de dois ciclos de inspeções realizados entre os anos de 2018 e 2021 em um universo de 6.383 obras de arte especiais brasileiras.

O Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO) do DNIT contempla, atualmente, funcionalidades de consulta, cadastro de OAEs e registro de inspeções. Com base nesses dados, foi possível avaliar a aplicação de um modelo de deterioração de estruturas em nível de rede, que favorece a implementação da funcionalidade de previsão do estado de condição do parque de obras ao longo do tempo. Tais resultados podem ser utilizados no contexto da Gerência de Estruturas para planejar as atividades de manutenção, visando atender aos requisitos determinados pela agência em termos de desempenho do parque de obras.

Os modelos de deterioração baseados em probabilidade produzem uma previsão futura do estado de condição das obras que melhor representa as incertezas inerentes aos processos

de deterioração. Por essa razão, observa-se na literatura a prevalência da sua adoção nos sistemas de gerenciamento de estruturas, em detrimento do uso de modelos empíricos e determinísticos.

Os resultados apresentados na Figura 2 mostraram uma satisfatória capacidade de previsão do modelo de deterioração, levando em consideração que o banco de dados de avaliação das OAEs foi restrito aos dois últimos ciclos de inspeções em obras administradas pelo DNIT. Em contrapartida, a acurácia do modelo é afetada por fatores como a subjetividade do inspetor, que pode causar flutuações irreais de nota, melhoramentos de nota não registrados no sistema e a falta de uniformidade na realização dos ciclos de inspeções.

Além disso, o estudo de validação da metodologia apontou semelhanças entre as curvas estimadas para as obras do SGO e as apresentadas no estudo de Devaraj (2009), conforme a Figura 3, tanto na totalidade da amostra como para aquelas selecionadas com base no tempo de construção. As previsões do modelo são diretamente relacionadas à dimensão do banco de dados de avaliação, ou seja: quanto mais dados de inspeções forem registrados, mais

transições são contabilizadas. Portanto, com a entrada de novos dados, provenientes de inspeções futuras, será possível aproximar a Matriz de Probabilidade de Transições ao desempenho real do parque de obras.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e ao Consórcio Engefoto-Pavesys, que, por meio do Contrato PP-00.0506/2021-00, permitiram o desenvolvimento dos estudos que possibilitaram a produção científica aqui apresentada.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. M. M. R. M. O. **Sistema de gestão de pontes com base em custos de ciclo de vida**. Tese (Doutorado em Engenharia). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- AUSTROADS. **Guide to Bridge Technology Part 7: Maintenance and Management of Existing Bridges**. 2. ed. ISBN 978-1-925451-92-4. Feb. 2018.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias**. Publicação 709, 2. ed. Rio de Janeiro, 2004.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **NORMA DNIT 010/2004 – PRO: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Brasil, 2004. 18p.
- DEVARAJ, D. **Application of non-homogeneous Markov chains in bridge management systems**. PhD Thesis. Wayne State University. Detroit, Michigan. 2009.
- ELBEHAIRY, H. **Bridge management system with integrated life-cycle cost optimization**. PhD Thesis. University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada. 2007.
- GOLABI, K.; SHEPHARD, R. Pontis: a system for maintenance optimization and improvement of US bridge networks. **Journal Interfaces**, v.1, p. 71-78, 1997.
- MADANAT, S.; MISHALANI, R.; IBRAHIM, W. H. W. Estimation of infrastructure transition probabilities from condition rating data. **Journal of Infrastructure Systems**. v. 1 (2), p. 120-125, 1995.
- MELO, Consórcio Pontis/Maia (Org.). **Implantação e operação em âmbito nacional do Sistema de Gerenciamento de Pontes - 3ª Fase: Relatório Final**. Brasília, 2004. 82p.
- MORCOUS, G. Performance prediction of bridges deck systems using Markov chains. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 20 (2), p. 146-155, 2006.
- OLIVEIRA, C. B. L. **Determinação e análise de taxas de deterioração de pontes rodoviárias do Brasil**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2019. 153p.
- ROELFSTRA, G. **Modele d'evolution de l'etat des ponts-routes en beton**. These n° 2310 - Grade de Docteur ès Sciences Techniques. Techniques, École Polytechnique Fédéral de Lausanne. 2001.
- SETUNGE, S.; HASAN, M. S. **Concrete bridge deterioration prediction using Markov chain approach**. RMIT University, Melbourne, Australia, p. 3-4, 2011.
- WOODWARD, R. J.; CULLINGTON, D. W.; DALY, A. F.; VASSIE, P. R.; HAARDT, P.; KASHNER, R.; ASTUDILLO, R.; VELANDO, C.; GODART, B.; CREMONA, C.; MAHUT, B.; RAHARINAIVO, A.; LAU, D. R.; MARKEY, I.; BEVC, L.; PERUS, I. **Deliverable D14: Final report**. Brime Project (Bridge Management in Europe), Contract N° RO-97-SC.2220. Mar. 2001.
- WU, D.; YUAN, C.; KUMFER, W.; LIU, H. A life-cycle optimization model using a semi-Markov process for highway bridge maintenance. **Applied Mathematical Modelling**, v. 43, p. 45-60, 2017.

ANÁLISE COMPARATIVA EM RELAÇÃO ÀS EMISSÕES DE CO₂ ENTRE O MODO DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO E HIDROVIÁRIO: ESTUDO DE CASO NA BR-356 E HIDROVIA DO PARAÍBA DO SUL

COMPARATIVE ANALYSIS OF CO₂ EMISSIONS BETWEEN ROAD AND WATERWAY TRANSPORTATION MODES: CASE STUDY ON BR-356 AND PARAÍBA DO SUL WATERWAY

Mauro Medeiros de Carvalho Junior - mauro.medeiros@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0000-4482-9548>

Thais de Moura Lima - moura_thais@id.uff.br - <https://orcid.org/0009-0008-8679-2745>

Marcelo Gomes Miguez - marcelomiguez@poli.ufrj.br - <https://orcid.org/0000-0003-4206-4013>

RESUMO: Historicamente, o setor de transporte nacional direciona a maior parte dos investimentos em infraestrutura para o modo rodoviário. No entanto, há um movimento para diversificar a matriz de transporte e promover a integração multimodal, indo ao encontro das recomendações do Tribunal de Contas da União (TCU) e do Plano Nacional de Logística (PNL) de 2035. Além disso, o país busca reduzir as emissões de gases de efeito estufa estando em alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo central comparar as emissões de CO₂ entre o transporte rodoviário em um trecho da BR-356/RJ e o transporte hidroviário, no trecho inferior do rio Paraíba do Sul, no estado do Rio de Janeiro. Para isso, foram utilizados dados de tráfego e modelagem do DNIT, visando a estimativa do volume de carga transportada. Ainda, para o cálculo das emissões de CO₂ foram seguidas as orientações metodológicas do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e do Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE). A análise subdividiu tanto o trecho rodoviário quanto o hidroviário, em três segmentos, sendo de 208,16 km a totalidade do trecho rodoviário e de 201,76 km, o hidroviário, havendo assim bastante semelhança e representatividade para o estudo proposto. Em síntese, o estudo contribui para uma melhor compreensão das emissões de CO₂ associadas aos dois diferentes modos de transporte estudados, fornecendo subsídios para a promoção de políticas de transporte mais sustentáveis e integradas no Brasil, em conformidade com as metas de desenvolvimento sustentável estabelecidas pela ONU.

PALAVRAS-CHAVE: hidrovias; navegação; emissões de CO₂; Paraíba do Sul.

ABSTRACT: *Historically, the transportation sector in Brazil directs the majority of its investments towards the road mode. However, there is a movement to diversify the transportation matrix and promote multimodal integration, aligning with the recommendations of the Federal Court of Accounts (TCU) and the 2035 National Logistics Plan (PNL). Additionally, the country aims to reduce greenhouse gas emissions in line with the United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs). In this context, the present study aims to compare CO₂ emissions between road transportation on a section of BR-356/RJ and waterway transportation on the lower section of the Paraíba do Sul River in the state of Rio de*

Janeiro. Traffic data and modeling from DNIT were used to estimate the volume of transported cargo. Methodological guidelines from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and the National Emissions Registry System (SIRENE) were followed to calculate CO₂ emissions. The analysis divided the road and waterway sections into three segments, with a total length of 208.16 km for the road segment and 201.76 km for the waterway segment, ensuring a significant and representative scope for the proposed study. In summary, this study contributes to a better understanding of CO₂ emissions associated with these two different modes of transportation and can provide insights for the promotion of more sustainable and integrated transportation policies in Brazil, in line with the United Nations' sustainable development goals.

KEYWORDS: *waterways; navigation; CO₂ emissions; Paraíba do Sul.*

1 INTRODUÇÃO

O setor de transporte está diretamente relacionado ao progresso de uma nação (Colavite & Konishi, 2015), proporcionando trânsito de mercadoria e de pessoas, sendo assim, de importância na economia de qualquer país. O modo rodoviário é o principal receptor dos investimentos públicos, concentrando 71,0 % de todos os recursos no período de 2001 a 2021 (R\$ 319,65 bilhões). Em seguida, estão o aéreo (12,9 %), o ferroviário (11,3 %) e, por último, o aquaviário (4,8 %) (CNT, 2022). A matriz de transporte brasileira, no diagnóstico atual, é altamente dependente do transporte rodoviário. Observa-se que para o ano-base do PNL (2017), 66,21 % da Tonelada Quilômetro Útil (TKU)¹ estava concentrado no modo rodoviário, e 83,25 % do Valor Quilômetro Útil (VKU), contra apenas 5,58 % (TKU) no modo hidroviário. Isso significa que, além de desempenhar papel considerável no transporte de grandes volumes, o transporte rodoviário de cargas é o grande responsável pelo transporte de bens de alto valor agregado para grande parte das demandas, de sua origem, até o destino (PNL, 2035).

Em observância ao tema, o Tribunal de Contas da União – TCU, em 2020, por meio de sua Secretaria-Geral de Controle Externo, realizou uma Auditoria Operacional acerca da “Integração Multimodal dos Transportes”. Uma das recomendações realizadas, por meio do Acórdão nº 1327/2020–TCU–Plenário, é que fossem adotadas medidas necessárias para que a navegação interior e de cabotagem estejam contempladas no Plano Nacional de Logística, tornando-se de fato um plano de integração multimodal.

Em complemento às recomendações do TCU, no Plano Nacional de Logística de 2035, há também menção à adoção de ações que busquem a redução das emissões de gases de efeito estufa nos diferentes modos de transporte no país, incentivando a diversificação da matriz nacional, em especial com o incremento do transporte hidroviário. De fato, esses objetivos podem se tornar realidade, estando assim em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

Em setembro de 2015, os 193 países membros da Organização das Nações Unidas (ONU) assumiram o compromisso com uma nova

¹ Os cálculos do TKU e do VKU consideram somente o transporte de cargas doméstico e os trechos em território nacional do que dizem respeito às cargas de exportação e

importação. Logo, não são apresentados os valores para a navegação de longo curso e os trechos de transporte rodoviário ou aeroviário, fora o território nacional.

agenda intitulada “Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável” (CNM, 2023).

Nesse sentido, a referida Agenda, que tem validade entre os anos de 2015 e 2030, está segmentada em 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), também conhecidos como Objetivos Globais. Ainda, em específico, o ODS 13, que trata da Ação Contra a Mudança Global do Clima, possui como uma de suas metas regionalizada, integrar a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), Lei nº 12.187/2009, às políticas, estratégias e planejamentos nacionais. Assim, a proposição de inserção da análise de emissões de CO₂ no planejamento estratégico de diferentes modos de transportes no Brasil está alinhada com os ODS, tanto a nível nacional quanto global.

Diante dos fatos, o presente artigo busca apresentar uma análise comparativa das emissões de CO₂ para o caso concreto, envolvendo um segmento rodoviário da BR-356/RJ e o trecho inferior da hidrovia do rio Paraíba do Sul, no estado do Rio de Janeiro. Para isso, visando à estimativa do cálculo da emissão de CO₂, foram seguidas as orientações do IPCC (2006), sendo esta a mesma base metodológica utilizada pelo Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE).

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo central realizar a análise comparativa em relação às emissões de CO₂ entre o modo de transporte rodoviário na BR-356/RJ, trecho compreendido entre o entroncamento com a BR-116 até o km-187,7, em Atafona, no município de São João da Barra, e modo de transporte hidroviário, que contempla a HN-602 (Resolução DNIT nº8, de 9 de junho de 2020), trecho localizado na porção inferior do rio Paraíba do Sul, isto é, desde sua

foz, no distrito de Atafona/RJ, até a confluência com o rio Pomba, onde há, também, uma interseção com a BR-116/MG.

Os resultados apresentados poderão servir como incentivo adicional a maior representatividade do modo hidroviário na matriz nacional de transporte, assim como alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

A utilização da hidrovia do Paraíba do Sul, no presente trabalho, para o transporte de carga ainda é uma proposta teórica devido à ausência de operações efetivas até o momento, porém encontra-se em fase de estudos iniciais. Dessa forma, os cenários de capacidade de carga transportada foram baseados em projeções fundamentadas em critérios técnicos, embora ainda hipotéticos, uma vez que a viabilidade técnica e econômica da hidrovia ainda não foi estudada.

Assim, os estudos aqui realizados sobre a equivalência de comboios-tipo visam oferecer informações iniciais sobre o potencial do transporte hidroviário na região, mas poderão ser evoluídos em estudos futuros, com a coleta de dados primários na hidrovia do Paraíba do Sul.

A comparação entre os modos de transporte quanto às emissões de CO₂ não considerou a implantação da hidroviária aqui analisada. Desse modo, por ausência de dados primários disponíveis, não foi incluído nos cálculos as emissões de CO₂ das possíveis intervenções necessárias para viabilização da hidrovia, tais como: dragagem, implantação de sinalização náutica, construção de portos e terminais, entre outras. Assim, a comparação se deu considerando apenas a fase operativa dos modais analisados, sem inclusões de atividades de manutenção ou implantação.

Por fim, não foi objetivo central do trabalho, há uma tipificação da carga potencial que poderá ser transportada na hidrovia em questão, porém dados do SEBRAE (2023) apontam a existência de 59.767 empresas, nos 7 municípios que são atravessados pelo segmento da hidrovia estudada, sendo 5.477 classificadas como indústrias, as quais poderiam ser beneficiadas com mais uma alternativa de transporte de sua carga. Além disso, na área de estudo há o Porto do Açu, localizado no município de São João da Barra, sendo o maior complexo portuário industrial da América Latina, o qual abriga 21 diferentes empresas e 10 terminais de classe mundial (Porto do Açu, 2023), que, também, poderia se beneficiar da hidrovia, com potencial transporte de carga e passageiros.

No entanto, as limitações supracitadas não invalidam a metodologia proposta e a qualificação dos resultados apresentados, podendo haver apenas pequenas alterações nos dados quantitativos estimados para as emissões de CO₂.

4 METODOLOGIA

Para a estimativa da emissão de CO₂, associado ao modo rodoviário, foi necessário avaliar, inicialmente, as características do tráfego de transporte de carga da BR-356/RJ, especificadamente no trecho destacado para a realização do estudo de caso. Assim, para estimativa das cargas transportadas, foram usados os dados do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) do DNIT, referente ao ano de 2018, situado no km-14 da referida rodovia. Ainda, para a estimativa do número de veículos que circulam em cada trecho, que é subdividido no Sistema nacional Viário (SNV), foi utilizada a

modelagem do Volume Médio Diário Anual (VMDa), de 2021, a qual foi produzida através do Termo de Execução Descentralizada (TED) entre o DNIT e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

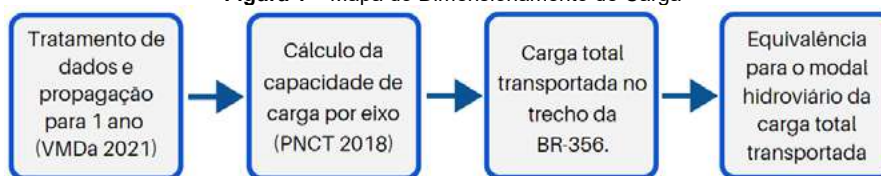
De acordo com a Nota Técnica elaborada pelo DNIT e que fundamenta a modelagem do VMDa, a metodologia usada baseia-se em 3 (três) pilares: os dados reais de tráfego, obtidos por meio de pesquisas manuais e de contadores automáticos; a rede rodoviária nacional vetorizada, com os respectivos atributos e parâmetros; e matrizes de origem e destino.

Neste contexto, as fontes de dados utilizadas nesta modelagem estão baseadas no sistema de contagem contínua do PNCT, assim como nos postos de coleta de cobertura e nos postos de pedágio de concessões rodoviárias das seguintes entidades: Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP), Empresa Gaúcha de Rodovias (EGR) e Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER-PR).

No caso concreto, os dados usados como base estão relacionados ao PNCT, uma vez que a rodovia não se encontra em concessão.

4.1 DIMENSIONAMENTO DE CARGA

Inicialmente, foi realizada a triagem dos dados e o dimensionamento de carga do trecho rodoviário em estudo. Destaca-se que estes passos são essenciais para a qualidade das informações geradas e antecedem o cálculo da emissão de CO₂. Na Figura 1 são apresentadas, sucintamente, as principais ações desenvolvidas nesta etapa.

Figura 1 – Mapa do Dimensionamento de Carga

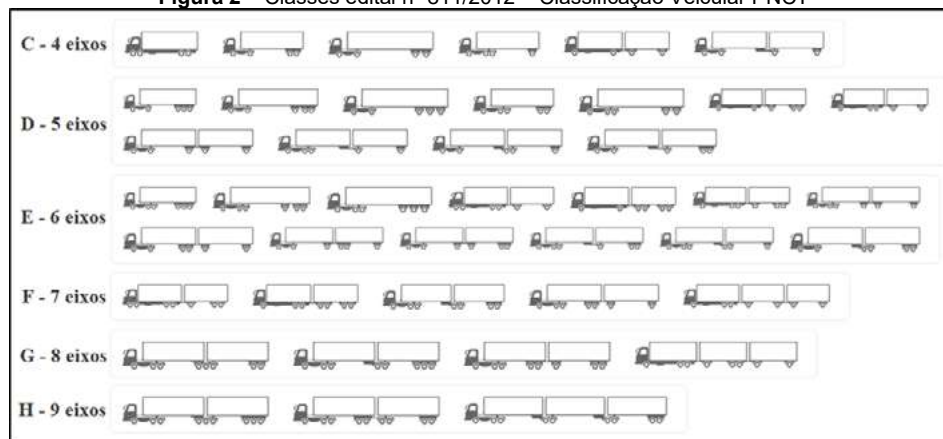
Fonte: Elaboração própria

Tendo em vista que a modelagem de 2021 apresenta a quantidade e tipologia dos veículos que trafegam em cada trecho do SNV da BR-356, na qual o mesmo veículo pode percorrer mais de um trecho do SNV, foi realizado o tratamento dos dados da modelagem, a fim de reduzir duplicidades na estimativa do total de veículos, assim como a incerteza e, consequentemente, possível superdimensionamento no cálculo de emissões. Cabe destacar, que ainda que haja algum possível superdimensionamento, o valor será incluído nos cálculos das emissões, não havendo assim prejuízos para a conclusão do presente trabalho.

Nessa perspectiva, o tratamento dos dados foi realizado por meio da média ponderada,

considerando a extensão de cada segmento da rodovia. Assim, cada dado do VMDa foi multiplicado pela respectiva extensão, em quilômetros, relativo ao código de SNV correspondente. Desta forma, após o tratamento dos dados, foi propagado a média diária para o período de 1 ano.

Na esteira do tema, visando o transporte de carga, foram usados os dados de tráfego dos veículos de 4 a 9 eixos (Figura 2), seguindo a classificação do Edital 811/2012 do PNCT. Assim, embasado na distribuição de peso por categoria, disposta na contagem de tráfego de 2018, foi calculado, por meio de média ponderada, a carga transportada para cada eixo e aplicado um fator de redução para a tara.

Figura 2 – Classes edital nº 811/2012 – Classificação Veicular PNCT

Fonte: adaptado do PNCT (2018)

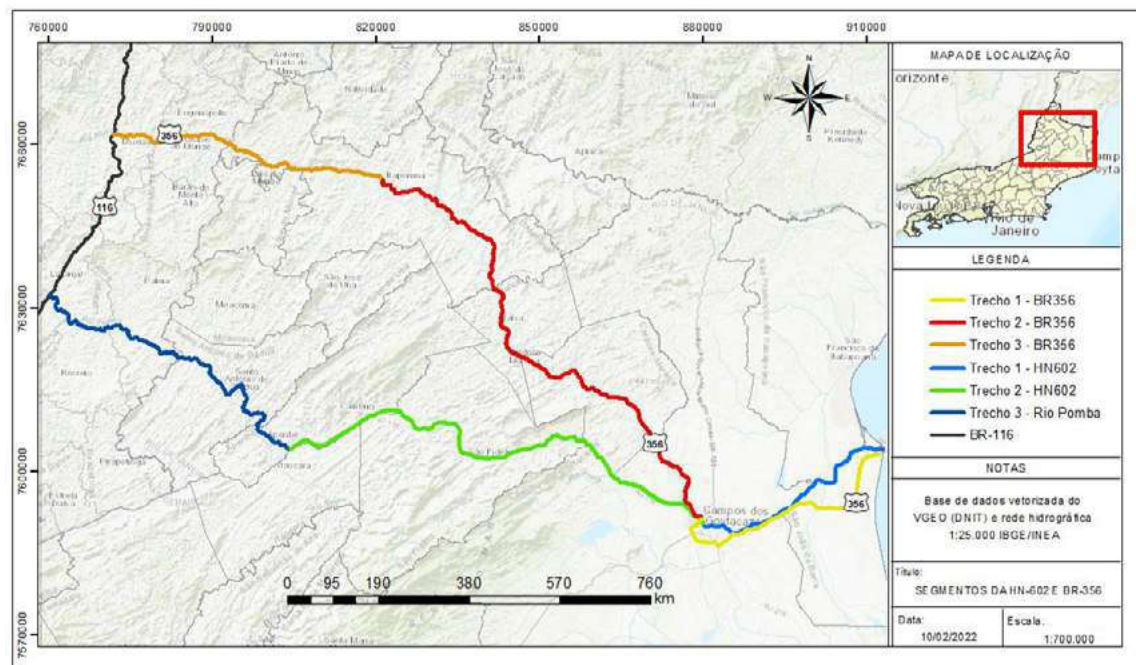
Nesse contexto, por paralelismo, os pesos por categoria foram usados para o dimensionamento, em tonelada, da carga total transportada no ano de 2021 para o trecho em estudo na BR-356. Assim, a carga transportada dos veículos de 4 a 9 eixos foi multiplicada pelos respectivos dados da modelagem por VMDa de 2021.

Destaca-se que, para melhor organização do cálculo e da comparação dos resultados, a rodovia e a hidrovia em estudo foram subdivididas em 3 (três) segmentos, conforme Figura 3. A segmentação da BR-356 buscou observar os deslocamentos entre as maiores áreas urbanas (Campos, Itaperuna e Muriaé). Para o modo

hidroviário, o rio Paraíba do Sul, também foi dividido em 3 segmentos, sendo o último já no rio Pomba e estando em alinhamento com a

extensão dos trechos rodoviários supracitados e as principais cidades ao longo de seu curso d'água.

Figura 3 – Mapa dos segmentos da hidrovia e rodovia em estudo



Fonte: Elaboração própria

Desse modo, tanto para a BR-356 quanto para a hidrovia, o primeiro segmento definido neste estudo parte de São João da Barra/RJ e se estendem até o município de Campos de Goytacazes, no Rio de Janeiro, onde os demais segmentos se subdividem. O segundo segmento da BR-356 segue de Campos/RJ a Itaperuna/RJ e o terceiro segmento se estende de Itaperuna/RJ até o entroncamento com a BR-116. Já, o segundo segmento hidroviário, segue de Campos dos Goytacazes/RJ até a Foz do Rio Pomba, na cidade de Aperibé/RJ e o terceiro segmento segue o percurso do Rio Pomba até o entroncamento com a BR-116.

De forma geral, comparando a extensão dos segmentos rodoviários (208,16 km) e hidroviário (201,76 km) estudados, pode-se observar que ambos possuem praticamente a mesma extensão, o que contribuiu para corroborar a

representatividade dos trechos escolhidos para fins de comparação das emissões de CO₂.

Por conseguinte, para o modo hidroviário, foi realizada a equivalência de comboios, que idealmente seriam usados no rio Paraíba do Sul, para transportar a mesma carga calculada para os trechos supracitados da BR-356.

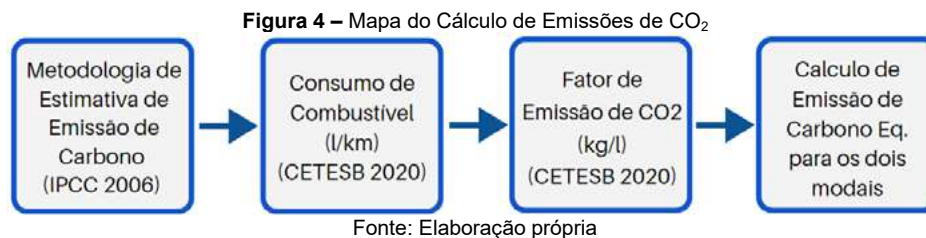
Assim, a capacidade de cada comboio foi estipulada por meio de 02 (dois) cenários. Para o primeiro, foram usados, como parâmetro, os comboios que trafegam nas hidrovias Tietê-Paraná da região sudeste. Já o segundo, está relacionado à capacidade mínima, que seria necessária para o modo hidroviário e rodoviário se igualarem em relação a emissões de CO₂.

4.2 ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE CO₂

Após dimensionadas as cargas transportadas por categoria e a equivalência de veículos e comboios necessários para os dois modais, o

passo seguinte foi a realização do cálculo da estimativa de emissão de carbono. Nessa etapa, foi necessária a definição da metodologia de

cálculo e de outros parâmetros adicionais. A Figura 4 ilustra as ações desenvolvidas ao longo desse processo.



Conforme o primeiro passo mostrado na Figura 4, a metodologia aqui adotada para o cálculo da emissão de CO seguiu as orientações do IPCC (2006), sendo esta a mesma base metodológica utilizada pelo Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE). Assim, com base na metodologia do IPCC, foram definidas as Equações 1 e 2:

$$Emissão = \sum_a [Combustível Estimado_a \times FE_a] \quad (1)$$

Sendo:

Emissão é a emissão de CO₂ em kg;

Combustível Estimado é o combustível consumido calculado pela Equação (2);

FE é o Fator de Emissão em kg/l;

a é o tipo de combustível.

$$Combustível Estimado = \sum_{i,j} [Veículos \times Distância] \times Fator de Consumo \quad (2)$$

Sendo:

Combustível Estimado é o total de combustível estimado usando o dado de distância;

Veículos é o número de veículos do tipo *i*, usando o combustível *j*;

Distância é a distância em quilômetros anuais viajados;

Fator de Consumo é a média de combustível consumido em l/km;

i são os veículos tipo;

j é o combustível tipo.

O cálculo da emissão de gás carbônico (Equação 1) baseia-se em dois parâmetros. O primeiro é o Fator de Emissão (*FE*), que é a massa de poluente emitida pelos veículos ao circular por uma determinada distância (CETESB, 2020). O segundo é Combustível Estimado, que é calculado por meio da Equação 2, sendo obtido através do combustível consumido em função da autonomia de cada tipo de veículo, ou seja, a distância percorrida pelo veículo consumindo determinada quantidade de combustível.

Nessa perspectiva, a Equação 2 integra o cálculo da estimativa de emissões de CO₂. Dos parâmetros atribuídos na equação supracitada, tem-se a tipologia dos veículos, que é representada pelos veículos de carga de 4 a 9 eixos, para o modo rodoviário, e os comboios usados no transporte hidroviário. Ainda, tem-se a distância percorrida e o fator de consumo configurado pela autonomia de cada veículo. Essa estimativa do Consumo Estimado leva em consideração, também, o combustível tipo, adotado como sendo o diesel, para ambos os casos de estudo, rodoviário e hidroviário.

Na esteira do tema, embasado no Relatório de Emissões Veiculares do Estado de São Paulo, para o ano de 2020, foi usado o fator de emissão para o combustível diesel (*FEa*) de 2,603 (kg/L). Ademais, sob a mesma bibliografia, foi fundamentada a autonomia em km/l dos veículos rodoviários de 4 a 9 eixos, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros consumo médio dos veículos rodoviários

FEa (Kg/L):	2,603
Consumo Caminhões (L/km):	
Semileves	0,11
Leves	0,18
Médios	0,18
Semipesados	0,29
Pesados	0,29

Fonte: Relatório de Emissões Veiculares do Estado de São Paulo (2020)

Por fim, o consumo de combustível do modo hidroviário, considerando um empurrador de comboio fluvial de potência de 800 hp, que comporta até 4 barcaças, foi de 13 litros por hora, de acordo com o documento "Diretrizes para a determinação do Comboio tipo de uma via navegável". Assim, levando em conta que a velocidade média de um comboio fluvial é de 12,5 km/h, foi dimensionada a autonomia em km/l.

5 RESULTADOS

Na realização dos cálculos para combustões móveis, foi usado o método de

quantificação de emissão de carbono elaborado pelo IPCC (2006), como descrito na seção de metodologia do presente documento. Nesse sentido, foram encontrados os valores de emissão de CO₂ para os dois modos de transporte aqui estudados.

5.1 RODOVIÁRIO

Diante dos dados obtidos no PNCT, relativo ao ano de 2018, foi determinada a carga transportada por cada tipo de veículo, classificados de 4 a 9 eixos, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Capacidade de carga por eixo

Categoria	Capacidade de carga (t)
4 Eixos	21,7
5 Eixos	31,0
6 Eixos	45,7
7 Eixos	50,8
8 Eixos	57,2
9 Eixos	74,1

Fonte: Adaptado do PNCT (2018)

Ademais, com a finalidade de fazer o primeiro input de dados, foi elaborada a Tabela 3 que fornece as informações iniciais a respeito da delimitação da área de estudo, incluindo os

Trechos de rodovia e o respectivo código SNV, além de apontar a extensão rodoviária, baseada nos dados contidos no estudo do VMDa, relativo ao ano de 2021.

Tabela 3 – Dados dos segmentos rodoviários de estudo

Dados de Entrada				
Trecho	SNV	Início	Fim	Extensão (KM)
1	356BRJ0450	São João da Barra	Campos de Goytacazes	21,6
	356BRJ0430			20,1
	356BRJ0410			5,7
2	356BRJ0390	Campos de Goytacazes - ENTR BR-101 (Trevo Sul de Campos)	Itaperuna	37,3
	356BRJ0385			0,8
	356BRJ0370			16
	356BRJ0350			6,66
	356BRJ0350			10,04
	356BRJ0330			15,2
	356BRJ0310			15,4
	356BRJ0305			0,6
	356BRJ0300			3,2
3	356BRJ0290	Itaperuna (Início pista Dupla)	Muriaé (ENTR BR-116)	5,4
	356BRJ0270			16,3
	356BRJ0250			8,2
	356BRJ0230			1,6
	356BMG0215			24,06
TOTAL:				208,16

Fonte: Adaptado do VMD (2021)

Ainda, observando os dados do VMD para o ano de 2021 referente ao modal rodoviário, foi estimado o total de 7.118.281 toneladas transportadas no ano (Tabela 4), seguindo os valores de capacidade de carga para cada eixo (Tabela 2), definidos com base no PNCT de 2018.

Tabela 4 – Número de veículos e carga transportada por segmento

Dimensionamento de Carga						
Trecho	Eixos	Veículos VMD	Veículos ANO	Carga Transportada ANO (t)	Total Veículos ANO	Total Carga transportada (t)
1	4	46	16868	366.281,23	50686	1.839.916,66
	5	30	11034	342.316,90		
	6	49	17757	811.217,06		
	7	6	2124	107.867,23		
	8	0	166	9.512,04		
	9	7	2736	202.722,19		
2	4	79	28992	629.560,66	92065	3.452.411,92
	5	47	17336	537.820,72		
	6	95	34856	1.592.386,37		
	7	13	4688	238.087,93		
	8	1	246	14.067,39		
	9	16	5946	440.488,85		
3	4	39	14064	305.385,90	47149	1.825.953,35
	5	19	6983	216.638,60		
	6	53	19501	890.912,88		
	7	9	3241	164.603,94		
	8	0,1	29	1.635,51		
	9	9	3331	246.776,53		
TOTAL:					189.900	7.118.282

Fonte: Adaptado do VMD (2021)

Na etapa do cálculo de emissões, primeiramente, foi dimensionado o consumo de combustível, sendo estimado o valor de 9.334.720 L/ano para os três segmentos da BR-356 em estudo e, posteriormente, foi realizada a quantificação da emissão de gás carbônico.

Assim, foram encontradas 24.298 toneladas de CO₂ para os 3 trechos, sendo: 6.330 toneladas (Trecho 01); 11.771 toneladas (Trecho 02); e 6.196 toneladas (Trecho 03), conforme ilustra a Tabela 5.

Tabela 5 – Cálculo do consumo de combustível e estimativa de CO₂ para rodovias

Cálculo de Consumo de Combustível e Emissão de CO ₂					
Trecho	Eixos	Veículos/ANO	Consumo de Combustível (L)	Emissões (t)	Emissões (t)
1	4	16868	627005	1632,09	6330,66
	5	11034	410156	1067,64	
	6	17757	1087142	2829,83	
	7	2124	130047	338,51	
	8	166	10177	26,49	
	9	2736	167535	436,09	
2	4	28992	1077690	2805,23	11771,38
	5	17336	644404	1677,38	
	6	34856	2134015	5554,84	
	7	4688	287045	747,18	
	8	246	15051	39,18	
	9	5946	364032	947,57	
3	4	14064	522763	1360,75	6196,24
	5	6983	259571	675,66	
	6	19501	1193945	3107,84	
	7	3241	198451	516,57	
	8	29	1750	4,55	
	9	3331	203943	530,86	
TOTAL:			9.334.720,34	24.298,28	24.298,28

Fonte: Elaboração própria

5.2 HIDROVIÁRIO

Quanto aos resultados obtidos para o modo hidroviário, na Tabela 6 é possível observar a

segmentação dos trechos com suas respectivas extensões, conforme definido no capítulo de metodologia do presente estudo.

Tabela 6 – Dados dos segmentos hidroviários de estudo

Dados de Entrada			
Trecho	Início	Fim	Extensão (Km)
1	Foz Atafona	Campos de Goytacazes	39,8
2	Campos de Goytacazes	Foz do Pomba	91,5
3	Foz do Pomba	BR 116	70,46
TOTAL:			201,76

Fonte: Elaboração própria

Considerando que a Hidrovia do Paraíba do Sul ainda não possui operação de carga, sendo restrita a pequenas embarcações que navegam entre São João da Barra e Campos, houve a necessidade de se buscar o dimensionamento teórico para o comboio-tipo. Nesse sentido,

baseado no Plano Diretor da Hidrovia Tietê-Paraná (2020) e, considerando um calado máximo de 2,50 m, adotou-se para o referido estudo de caso, o comboio-tipo com capacidade de transporte de 2.500 toneladas, conforme ilustra a Tabela 7.

Sendo assim, em relação ao primeiro cenário proposto, isto é, no qual buscou-se a determinação do número de comboios-tipo de 2.500 toneladas, que são necessários para transportar o total da carga estimada para o modo rodoviário (7.118.281 toneladas – Tabela 4), obteve-se o valor estimado de 2.848 comboios/ano.

Por seguinte, foi realizado o cálculo do consumo de combustível, considerando a

autonomia 13 L/h de diesel e velocidade média do empurrador de 12,5 km/h, resultando em 215.396 L/ano.

Após a quantificação do consumo de combustível, foi possível fazer a estimativa do cálculo de emissões de CO₂, que resultou em 560,68 toneladas/ano, sendo este consideravelmente menor que o valor de emissões de CO₂ para o modal de rodoviário.

Tabela 7 – Cálculo do consumo de combustível e estimativa de CO₂ para comboios de 2500 (t)

Dimensionamento de Carga			Cálculo de Emissão de CO ₂		
Trecho	Carga Transportada (t)	Capacidade de Carga por Comboio (t)	Comboios ANO	Consumo de combustível (L)	Emissões (t)
1	1.839.916,66	2500	736	30463,13	79,30
2	3.452.411,92	2500	1381	131412,61	342,07
3	1.825.953,35	2500	730	53521,18	139,32
TOTAL:			2.847	215.396,92	560,68

Fonte: Elaboração própria

Em síntese, conforme comprovam os resultados deste estudo, ao comparar-se a emissão de CO₂ para o transporte de uma mesma carga no modo rodoviário e hidroviário, observou-se uma redução de 97,7 % nas emissões associadas ao modal hidroviário.

Ainda, simulou-se, adicionalmente, um segundo cenário, no qual o número de emissões entre os dois modais de transporte foi mantido igual, isto é, tanto para o segmento hidroviário quanto para o rodoviário em estudo, foi adotado o

valor de 24.298 toneladas de CO₂, conforme já apresentado na Tabela 5.

Assim, o valor de capacidade de carga para os comboios foi estimado em 57,7 toneladas (Tabela 8), resultando em 123.395 comboios/ano. A partir deste resultado pode-se concluir que comboios que façam o transporte a partir de 57,7 toneladas já se mostram mais eficientes que o modo rodoviário, quanto à questão das emissões aqui analisadas.

Tabela 8 – Cálculo do consumo de combustível e estimativa de CO₂ para comboios de 57,7 (t)

Dimensionamento de Carga			Cálculo de Emissão de CO ₂		
Trecho	Carga Transportada (t)	Capacidade de Carga por Comboio (t)	Comboios ANO	Consumo de Combustível (L/ano)	Emissões (t)
1	1.839.916,66	57,7	31.895	1.320.190,01	3.436,45
2	3.452.411,92	57,7	59.847	5.695.068,09	14.824,26
3	1.825.953,35	57,7	31.653	2.319.463,47	6.037,56
TOTAL:			123.395	9.334.721,57	24.298,28

Fonte: Elaboração própria (2023)

Diante dos resultados apresentados (Tabela 9), percebe-se uma diferença significativa em relação ao consumo de combustível entre os modos de transporte estudados, isto é, no modo

rodoviário nota-se consumos consideravelmente superiores, e por conseguinte, também das emissões de CO₂.

Tabela 9 – Síntese dos resultados do cenário com comboios de 2500 toneladas

Rodoviário		Hidroviário	
BR-356/RJ		Paraíba do Sul (segmento estudado)	
Extensão (km):	208,16	Extensão (km):	201,76
nº de veículos:	189.900	nº de comboios:	123.395
Consumo Combustível (L)	9.334.720,34	Consumo Combustível (L)	215.396,92
Emissões CO₂ (g):	24.298,28	Emissões CO₂ (g):	560,68

Fonte: Elaboração própria (2023)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos e na comparação entre os modos de transporte rodoviário e hidroviário, foi possível evidenciar a importância de incentivo à multimodalidade dos transportes no Brasil, não só considerando a eficiência logística, como também os aspectos ambientais, em especial, as emissões de gases estufa, como o CO₂.

Para o caso concreto em análise, observou-se diferenças significativas no consumo de combustíveis e, consequentemente, nas emissões de CO₂ entre os modos estudados, quando comparada a mesma carga transportada. Por um lado, o transporte rodoviário apresentou um consumo total de combustível de 9.334.720 litros por ano, resultando em emissões de CO₂ de 24.298 toneladas. Por outro lado, o modal hidroviário, apesar de possuir um consumo de combustível maior por empurrador, mostrou-se muito mais eficiente em termos de emissões, devido ao número reduzido de empurradores que

são necessários para transportar a mesma carga rodoviária.

Assim, o consumo de combustível estimado foi de 215.396 litros por ano, resultando em 560,68 toneladas de emissões de CO₂, isto é, uma redução de 97,7 % nas emissões, quando comparado com o rodoviário.

Ainda, em um segundo cenário proposto, no qual o número de emissões entre os dois modos de transporte foi considerado igual, foi possível concluir que comboios que fazem o transporte de cargas superiores a 57,7 toneladas já se mostram mais eficientes quanto à questão das emissões CO₂.

Esses resultados destacam a importância de considerar o modo hidroviário nos planos logísticos de transportes, em consonâncias com as recomendações dos órgãos de controle e alinhamento com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), além de promover maior diversificação e integração multimodal.

REFERÊNCIAS

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Resolução DNIT nº08, de 9 de junho de 2020**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/resolucao-ndeg-8-2020.pdf>. Acesso em: maio de 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Transporte em Foco - Investimentos públicos Federal – Parte 1 (2022)**. Disponível em: <https://cnt.org.br/analises-transporte>. Acesso em: jul. 2023.

COLAVITE, A. S.; F. KONISHI. **A matriz do transporte no Brasil: uma análise comparativa para a competitividade**. Anais XII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, SEGeT, 2015.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Relatório de Emissões Veiculares 2020**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2022/03/Relatorio-Emissoes-Veiculares-2020.pdf>. Acesso em: maio de 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.DNIT. Institucional. Disponível em: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Inicio/institucional>. Acesso em: maio de 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Nota Técnica do VMDA 2020**. Brasília, 2020. Disponível em: https://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Modelagem/NOTA_TECNICA_DO_VMDA_2020.pdf. Acesso em: 10 de maio de 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **NT modelagem 2021**. Brasília, 2022. Disponível em: https://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Modelagem/NT_2022_VMDA2021.pdf. Acesso em: maio de 2023.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE); NGGIP (NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES PROGRAMME). **Chapter 3: Mobile Combustion**. In: IPCC GUIDELINES FOR NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES, Volume 2: Energy. Japan: IGES (Institute for Global Environmental Strategies), 2006. p. 3.1-3.47. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf. Acesso em: maio de 2023.

PNL. **Plano Nacional de Logística: 2035**. Brasília, DF, 2021.

PORTAL DA CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (BRASIL). **Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <http://www.ods.cnm.org.br/agenda-2030>. Acesso em: maio de 2023.

PORTO DO AÇU. Nossa empresa. Disponível em: <https://portodoacu.com.br/nossa-empresa/>. Acesso em: ago. de 2023.

RIBEIRO, E. S. **Correlações de emissões e características do combustível em um motor de combustão interna com ignição por centelha operando com biogás e gás natural**. 2021. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-20122021-111010/publico/ElcioSilvaRibeiroCorr21.pdf>. Acesso em: maio de 2023.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). **Data Sebrae Painéis–Empresas**. Disponível em: <https://datasebraeindicadores.sebrae.com.br/resources/sites/data-sebrae/data-sebrae.html#/Empresas>. Acesso em: ago. de 2023.

SECRETARIA DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES. **Plano Diretor Hidrovia Tietê - Comboios**. 2021. Disponível em: <http://www.dh.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/07/Plano-Diretor-Hidrovia-Tiete-Comboios-jun2021.pdf>. Acesso em: maio de 2023.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO. TCU. **Acórdão nº 1327/2020–TCU–Plenário**. Brasília, DF, 2020.

GESTÃO FINANCEIRA DE RISCOS EM DESLIZAMENTOS DE ENCOSTAS: ESTIMATIVA DE PROVISÕES ANUAIS BASEADA EM DADOS DO DNIT

FINANCIAL RISK MANAGEMENT OF SLOPE LANDSLIDES: ESTIMATION OF ANNUAL PROVISIONS BASED ON DNIT DATA

Bernardo Cascão Pires e Albuquerque - balbuquerque@gmail.com - <https://orcid.org/0009-0002-3217-485X>

Darym Junior Ferrari de Campos - darymjuniord@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-7128-3752>

Bruna Cardoso Mendes - bcmflorestal@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0001-9055-1612>

RESUMO: As obras emergenciais desencadeadas por eventos naturais afetam diretamente a infraestrutura de transporte, resultando em interrupções de tráfego, ameaças à segurança e ao conforto dos usuários, além de acréscimos nos custos logísticos. Essas ocorrências demandam ação imediata das instituições responsáveis por gerir a infraestrutura afetada, levando à mobilização urgente de recursos humanos e financeiros. Embora imprevisíveis, a estimativa antecipada de investimentos em prevenção, adaptação e recuperação de tais desastres naturais é crucial para o planejamento orçamentário, seja ele público ou privado. Neste contexto, esta pesquisa introduz uma metodologia de fácil implementação e resiliente a cenários de escassez de dados, logrando avaliar riscos e estimar custos vinculados a deslizamentos de massas. Como forma de tangibilizar os resultados obtidos, aplicou-se o procedimento ora discutido à malha rodoviária federal brasileira sob jurisdição do DNIT.

PALAVRAS-CHAVE: obras emergenciais; análise de risco; previsão orçamentária; infraestrutura de transportes; infraestrutura rodoviária; malha rodoviária do DNIT.

ABSTRACT: Emergency works triggered by natural events directly impact transportation infrastructure, leading to traffic disruptions, threats to user safety and comfort, and increases in logistical costs. These incidents require immediate action from institutions responsible for managing the affected infrastructure, leading to an urgent mobilization of human and financial resources. While unpredictable, the early estimation of investments in prevention, adaptation, and recovery from such natural disasters is crucial for budget planning, whether it be public or private. In this context, this research introduces a methodology that can be easily implemented and is resilient to scenarios of data scarcity, successfully assessing risks and estimating costs associated with mass landslides. To materialize the obtained results, the discussed procedure was applied to the Brazilian federal road network under the jurisdiction of DNIT.

KEYWORDS: emergency works; risk analysis; budget planning; transport infrastructure; highway infrastructure; DNIT highway system.

1 INTRODUÇÃO

As obras emergenciais consistem em estruturas que demandam ações rápidas ou imediatas, pois qualquer tipo de atraso pode

acarretar danos à infraestrutura e interdições de tráfego. Em relação à infraestrutura, a variabilidade climática, já mencionada por Palmieri & Larach (1996) e Giltirana Jr. (2005), representa um dos agentes mais relevantes quando se trata dos problemas de estabilidade do solo. Dos tipos de variação climática, temos como maior impacto os eventos pluviométricos, tratados como agente causador, que podem resultar em frentes de umedecimento responsáveis por provocar desastres naturais e ocorrências emergenciais nas rodovias do país, como é o caso de deslizamento em estradas. Ainda, vale destacar que a variabilidade climática interfere nas ações da política de infraestrutura do Sistema Federal de Viação (SFV).

Dessa forma, o foco da pesquisa terá como base de dados o monitoramento das rodovias, visando aumentar a resiliência das rodovias federais contra ameaças naturais, buscando gerar ganhos para a sociedade em geral. A análise da resiliência compreende tanto os princípios de vulnerabilidade e suscetibilidade quanto os de risco.

Os dados de deslizamentos de massa foram inicialmente acessados pela base aberta do Repositório Cooperativo Aberto *Online* de Deslizamentos de Massa da NASA, utilizada para validação do modelo de Avaliação de Perigo de Deslizamento para Conscientização Situacional. Tais dados identificam locais com alto potencial para deslizamentos de massa, combinando estimativas de precipitação baseadas em satélite com variáveis de suscetibilidade a deslizamentos de massa (Stanley *et al.*, 2021).

O uso da análise probabilística e de risco tem sido uma ferramenta muito relevante para a engenharia de transportes, uma vez que requer estudos mais aprofundados em relação à análise apenas determinística. Nesse contexto, será

montado um banco de dados com a compilação de informações referentes ao Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) e da NASA, com o objetivo de desenvolver uma metodologia de avaliação de risco e previsão de custos de obras emergenciais. Devido à variabilidade das ocorrências de emergência, foi motivado um estudo estatístico baseado na Avaliação Quantitativa de Riscos (QRA), já realizado anteriormente por Albuquerque *et al.* (2019), e no método computacional de Monte Carlo.

2 OBRAS EMERGENCIAIS

Toda extensão de Malha Rodoviária Federal (MRF), sob administração do DNIT, possui diferentes níveis de serviço e de condições de conservação, suscetíveis à exposição de vários tipos de desastres naturais ao longo de sua extensão. Sendo assim, o evento acaba por inferir na segurança dos usuários e em fatores socioeconômicos ao danificar um elemento rodoviário ou prejudicar o tráfego nas rodovias.

Segundo o Manual de Sinalização de Obras e Emergências em Rodovias (IPR, 2010), as situações emergenciais se caracterizam pela condição de imprevisibilidade e, quando ocorrem, são tomadas decisões e ações rápidas, especificamente em nível operacional. Já na lei nº 8.666/93, Art. 24 (Brasil, 1993), são considerados casos de emergência, para fins de dispensa de licitação, somente aqueles em que seja caracterizado urgência no atendimento da situação que possa ocasionar prejuízo ou comprometer a segurança das pessoas, obras, serviços, equipamentos e outros bens públicos ou particulares, e somente para bens necessários ao atendimento da situação emergencial ou calamitosa e para as parcelas de obras e serviços que possam ser concluídos no prazo máximo de 180 (cento e oitenta) dias consecutivos e

ininterruptos, contados da ocorrência da emergência ou calamidade, vedada a prorrogação dos serviços contratados.

2.1 DADOS E TRATAMENTO

A base de dados foi extraída a partir do Sistema de Informações e Monitoramento do DNIT (SIMDNIT), do SIAC e do Modelo de Avaliação de Perigo de Deslizamento para Conscientização Situacional da NASA.

2.1.1 SISTEMA DE INFORMAÇÕES E MONITORAMENTO DO DNIT

O SIMDNIT sistema permite o acesso ao banco de dados do ambiente de gestão de

conteúdos corporativos do DNIT, contemplando desde a execução orçamentária e financeira, quanto a situação dos contratos de obras e estatísticas de tráfego de rodovias. Destaca-se que o período de análise das obras emergenciais utilizado na presente pesquisa engloba os registros classificados na modalidade que dispensa licitação, descrita no art. 24, inciso IV da lei 8.666/93 (Brasil, 1993), entre os anos de 2009 e 2018. Para esse período e a partir da base do Sistema de Acompanhamento de Contratos (SIAC), integrada ao SIMDNIT, coletou-se informações com as características de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Filtros de pesquisa ao SIAC

Filtro	Valores adotados
Tipo de Contrato	Obra de Engenharia
Modal	Rodoviário
Modalidade de Licitação	ART. 24-IV- Emergência ou de calamidade pública
Tipo de Intervenção	Obra de Engenharia
Objeto de Contratação	Foram considerados todos os objetos de contratação que envolviam execução de obras relacionadas ao pavimento e a manutenção de suas boas condições de uso, tal como situações de obras para desobstrução das rodovias

Fonte: Elaboração própria

O procedimento acima descrito resultou em 232 contratos. Contudo, é prática comum a contratação de uma única empresa para sanar problemas ocorridos por um grupo de sinistros em localidades próximas, portanto faz-se necessário identificar a quantidade de obras presentes em cada contrato. Por falta de informação, esse procedimento não foi possível para 72 contratos, entretanto, os 160 contratos restantes foram exitosamente segregados em 267 ocorrências ao longo do período de 10 anos estudados.

O desembolso para cada contrato foi determinado por meio das medições com reajuste (PI+R) obtidas pela base de dados do SIAC. Conforme já mencionado, alguns contratos

englobam mais de um sinistro rodoviário, dificultando o manuseio preciso dos dados espaciais, uma vez que a informação de desembolso se vincula a mais de uma intervenção. Como forma de mitigação desse tipo de problema, nos contratos que abrangeram segmentos rodoviários descontínuos, considerou-se que o montante total pago fosse repartido igualmente para cada uma das obras.

Ainda, sabe-se que o valor do capital é diferente com o passar do tempo, havendo a necessidade de reajustar os valores para contemplar, principalmente, os efeitos da inflação. Todos os valores foram reajustados para o mês base de dezembro de 2022 por meio do Índice

Geral de Preços – Disponibilidade Interna (IGP-DI), disponibilizado mensalmente pela Fundação Getúlio Vargas (FGV).

2.1.2 MODELO DE AVALIAÇÃO DE PERIGO DE DESLIZAMENTO PARA CONSCIENTIZAÇÃO SITUACIONAL

Esse modelo é descrito internacionalmente como *Landslide Hazard Assessment for Situational Awareness* (LHASA), fornecendo uma estimativa do risco ao deslizamento de massa, baseando-se em um mapa de suscetibilidade global e entradas de estimativas de precipitação da NASA (Stanley *et al.* 2017). Sua atualização é feita a cada 3h, com uma latência de

aproximadamente 4h, o que proporciona uma saída quase em tempo real. Para essa pesquisa será utilizada apenas a categorização quanto ao risco presente no mapa de suscetibilidade ao deslizamento de encostas, desprezando-se os dados de estimativas de precipitação.

O mapa aberto é desenvolvido para uma resolução de 1km, ou seja, o globo foi segmentado em territórios de 90x90 m², sendo atribuído a cada um desses territórios a seguinte classificação de risco (Tabela 2), a partir do relevo, formação geológica e precipitação média histórica das regiões:

Tabela 2 – Categorias de risco do LHASA	
Categoria	Risco
5	Muito Alto
4	Alto
3	Médio
2	Baixo
1	Muito baixo

Fonte: Stanley *et al.* (2021)

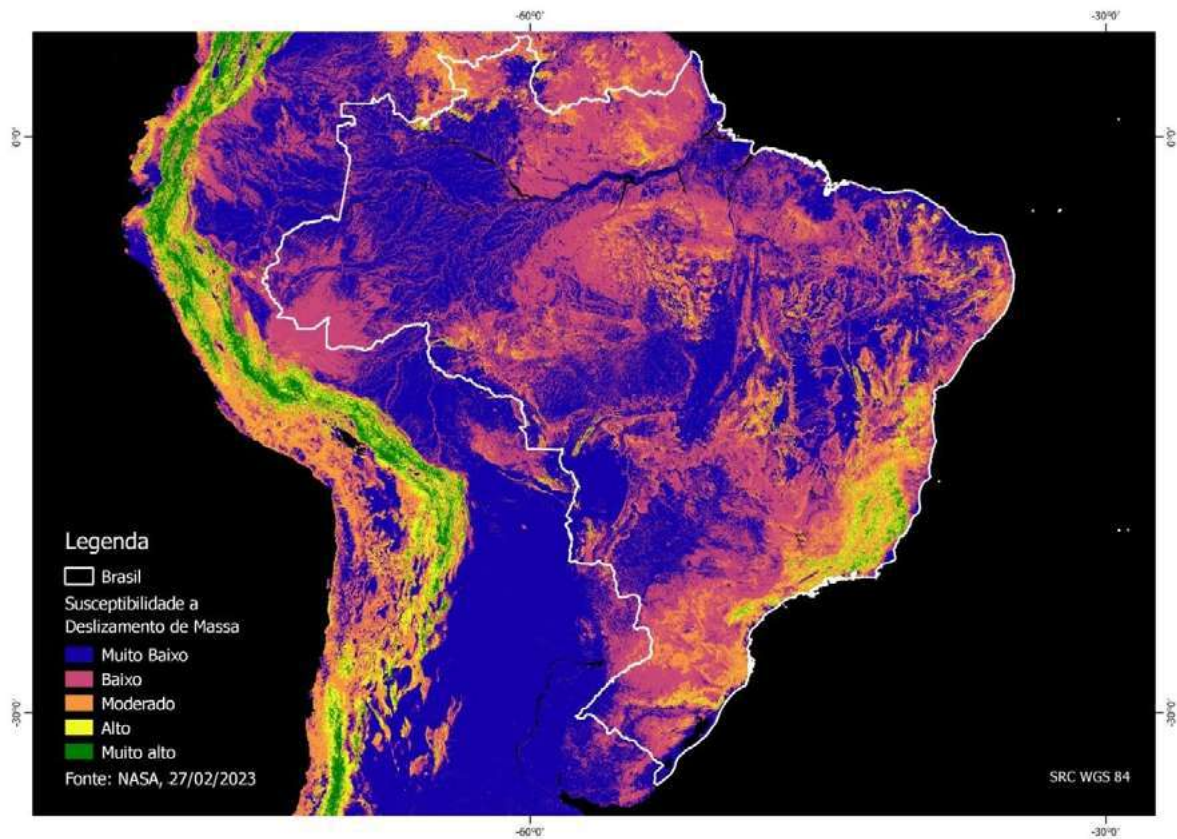
2.2 ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS

Tanto os dados de sinistros do DNIT quanto o mapa de suscetibilidade da NASA foram cruzados com a versão mais recente do SNV do DNIT (versão 202304), de forma a ser possível determinar tanto o risco percebido pela infraestrutura implantada quanto averiguar em qual classe de suscetibilidade se enquadram os deslizamentos ocorridos.

O mapa de suscetibilidade ao deslizamento de massa foi espacializado com auxílio da ferramenta do tipo Sistema de Informações Geográficas (SIG) em uma base georreferenciada da versão mais recente do SNV do DNIT (versão 202304), possibilitando a identificação do risco em cada segmento da malha rodoviária do DNIT.

Ilustra-se o mapa na Figura 1 e a extensão da malha rodoviária do DNIT por categoria de risco do LHASA, é apresentado na Tabela 3.

Já os dados do SIMDNIT foram especializados nas versões do SNV existentes à época dos deslizamentos, sendo posteriormente trazidos para a versão 202304 do SNV. Tal procedimento faz-se necessário uma vez que obras como a construção de variantes e contornos, ou mesmo as correções de traçado, alteram a referência da quilometragem de uma localidade, não sendo recomendável o uso desse indicador para o comparativo da malha federal em diferentes períodos. O cruzamento desses dados com as categorias de risco do LHASA resultaram os valores da Tabela 4.

Figura 1 – Mapa de susceptibilidade a deslizamento de massa

Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 – Extensão (km) da Malha rodoviária do DNIT por categoria de risco do LHASA

	1	2	3	4	5	Total
AC	284.9	900.2	3.2	0.0	0.0	1188.3
AL	270.7	312.9	189.5	33.6	2.1	808.8
AM	583.4	1678.2	48.2	7.9	0.8	2318.4
AP	268.1	702.2	42.2	0.0	0.0	1012.5
BA	3238.7	2416.9	898.8	279.1	81.2	6914.7
CE	1244.0	841.0	137.6	57.4	40.8	2320.7
DF	63.2	77.8	14.5	4.2	0.1	159.8
ES	2.2	69.7	119.9	208.1	218.3	618.2
GO	1070.9	958.5	106.6	17.8	13.9	2167.7
MA	1648.2	1476.2	210.7	0.0	0.0	3335.1
MG	488.9	2379.9	1571.8	787.0	390.6	5618.1
MS	2528.6	758.8	49.4	2.5	2.1	3341.4
MT	2398.0	1318.6	146.2	43.0	33.8	3939.7
PA	1304.9	2379.8	351.5	3.6	0.0	4039.8
PB	508.1	670.4	91.1	13.9	7.3	1290.7
PE	925.3	871.1	279.7	46.9	9.0	2132.0
PI	1319.8	1142.2	115.5	14.3	2.1	2593.9
PR	263.6	2796.8	576.1	72.4	48.4	3757.4
RJ	54.9	35.5	105.8	58.3	59.9	314.4
RN	1014.9	439.9	52.7	25.4	9.8	1542.7

(continua)

	1	2	3	4	5	Total
RO	669.0	1297.4	92.0	24.7	4.5	2087.6
RR	744.3	742.3	53.9	11.7	0.0	1552.2
RS	1468.0	3301.1	365.3	99.0	20.5	5253.8
SC	59.8	879.3	675.8	99.8	7.0	1721.7
SE	49.0	249.4	21.9	0.7	0.0	321.0
SP	16.0	11.6	7.4	10.4	10.3	55.7
TO	1090.3	809.5	45.7	8.1	1.7	1955.4
Total	23577.8	29517.1	6373.0	1929.7	964.2	62361.8

Fonte: Elaboração própria

Tabela 4 – Sinistros por categoria de risco do LHASA

	1	2	3	4	5	Total
2009	2	2	0	1	1	6
2010	5	3	4	3	21	36
2011	8	4	9	6	4	31
2012	9	13	6	18	27	73
2013	12	7	0	4	8	31
2014	2	8	7	2	5	24
2015	0	3	3	0	4	10
2016	0	6	1	2	18	27
2017	1	1	3	3	14	22
2018	1	2	0	1	3	7
Total	40	49	33	40	105	267

Fonte: Elaboração própria

3 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO

A avaliação de um risco representa um procedimento deliberado de estudo e de revisão de sistemas, na expectativa de antecipar todos os possíveis perigos e consequentes evoluções adversas. Não existe um procedimento específico de avaliação e identificação de risco aplicável a todos os casos. Segundo Caldeira (2005) e Montoya (2013), por exemplo, as análises de risco contemplam um vasto campo de aplicação.

O tipo de problema, os dados disponíveis, o grau em que há dependência de julgamento subjetivo e os critérios que serão utilizados para julgar se o risco é aceitável, dependerá da abordagem mais adequada, e esta determinará a escolha do método. Para a presente pesquisa, optou-se pela Avaliação Quantitativa do Risco (QRA), que é um método bastante difundido para quantificar a exposição ao risco em um

determinado processo. Segundo a QRA, define-se o risco como a probabilidade de ocorrência de um evento multiplicado pelo impacto desse evento, como mostrado pela Equação 1. Dessa forma, interpretou-se que o risco não depende apenas da probabilidade de um evento ocorrer, mas também dos impactos ou consequências atreladas a ele.

$$R = P \times I \quad (1)$$

Segundo Walpole e Myers (1978), o conceito clássico de probabilidade para resolução de problemas pode ser resolvido pela abordagem empírica bayesiana, podendo ser aplicada tanto a eventos que podem ser repetidos, quanto a eventos que representam acontecimentos únicos.

Albuquerque *et al.* (2019) pontuam que, com o passar dos anos e com a ocorrência de novos desastres naturais, espera-se que as obras de

remediação aumentem a resiliência da malha rodoviária federal. Consequentemente, a incidência de obras emergenciais deve se tornar cada vez menor.

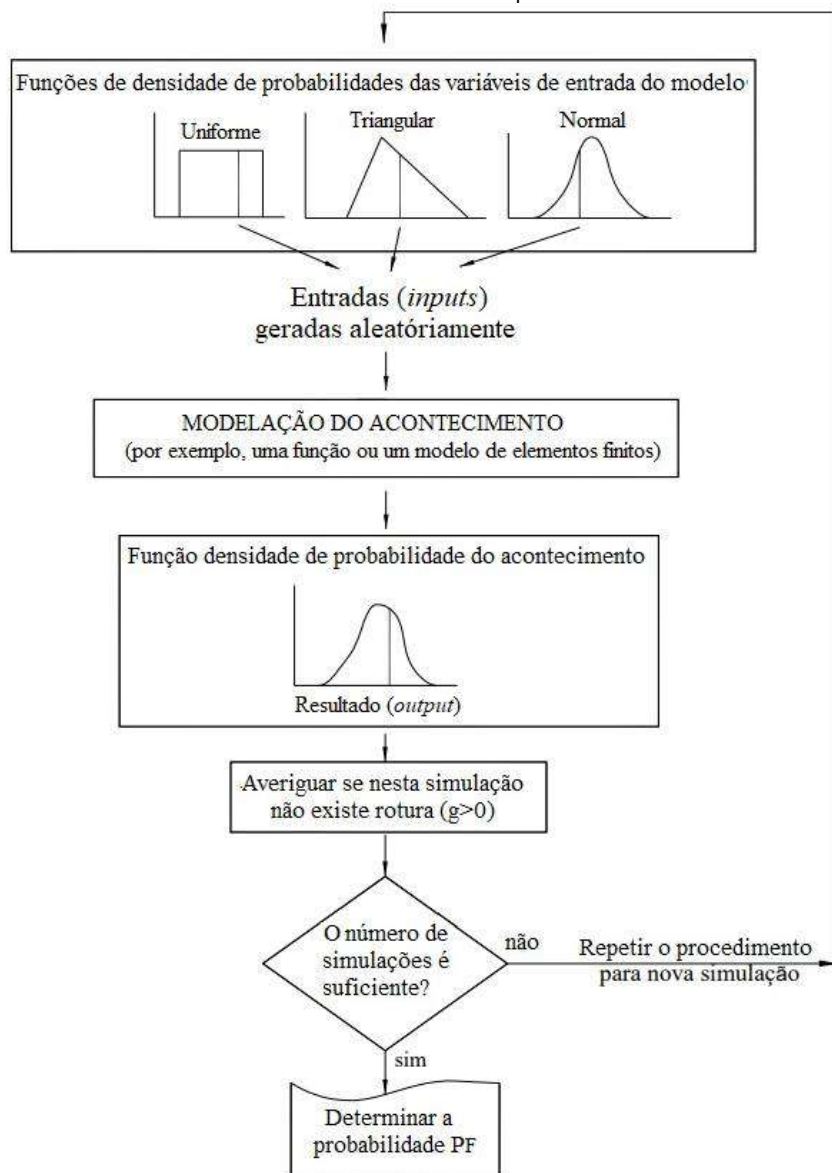
3.1 MÉTODO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo é inspirado no trabalho do matemático Stanislaw Ulam, que constantemente frequentava o famoso cassino de Monte Carlo, cujo aspecto aleatório de suas roletas está intimamente ligado ao próprio método. Posteriormente, em 1949, o método

formalizou-se por meio do artigo intitulado Monte Carlo Method, publicado por John Von Neumann e Stanislaw Ulam (Eckhardt, 1987).

Para um breve entendimento, ilustra-se na Figura 2 uma possível simulação de Monte Carlo para a determinação da probabilidade de falha PF em um acontecimento que possa ser representado por qualquer modelo matemático. Na figura ilustrada por Santos (2006), observam-se três variáveis independentes de entrada definidas pelas suas respectivas Funções de Densidade de Probabilidade (FDP).

Figura 2 – Simulação do método de Monte Carlo para determinar a probabilidade de falha PF de um evento modelo com três variáveis estatisticamente independentes



Fonte: Santos (2006)

Segundo Kottegoda e Rosso (1997), uma variável aleatória apresenta valores imprevisíveis que constituem seu espaço amostral. O método exige que as variáveis do sistema matemático sejam descritas em termos de funções de densidade de probabilidade. Assim, para cada variável, gera-se um resultado possível obedecendo sua distribuição de probabilidade. Realizam-se análises determinísticas para o conjunto de valores gerados e determina-se o fator de segurança. Esse processo deve ser repetido tantas vezes quanto necessário para que se possa determinar a distribuição de probabilidade.

Diversos tipos de distribuições são facilmente encontrados na literatura. Como exemplo, pode-se citar a distribuição normal, lognormal, exponencial, uniforme, triangular, gama, geométrica, hiperbólica, Poisson, Dagum, entre outras.

O próximo passo do método de Monte Carlo consiste em gerar uma amostra da distribuição do fator de segurança, da qual obtém-se quaisquer parâmetros estatísticos, incerteza da medição padrão associada e inclusive a probabilidade de abrangência do intervalo de confiança.

Os resultados da simulação de Monte Carlo

podem estar sujeitos a erros, pois trata-se de uma técnica de amostragem e, por esta razão, quando aplicada a problemas reais (análise de projetos), requer eficiência computacional para que as aproximações sejam satisfatórias.

4 ANÁLISES E VISUALIZAÇÃO DE RESULTADOS

O procedimento adotado para se determinar a expectativa de investimentos baseou-se em dois critérios: o histórico e a avaliação quantitativa do risco, explicados nas seções subsequentes.

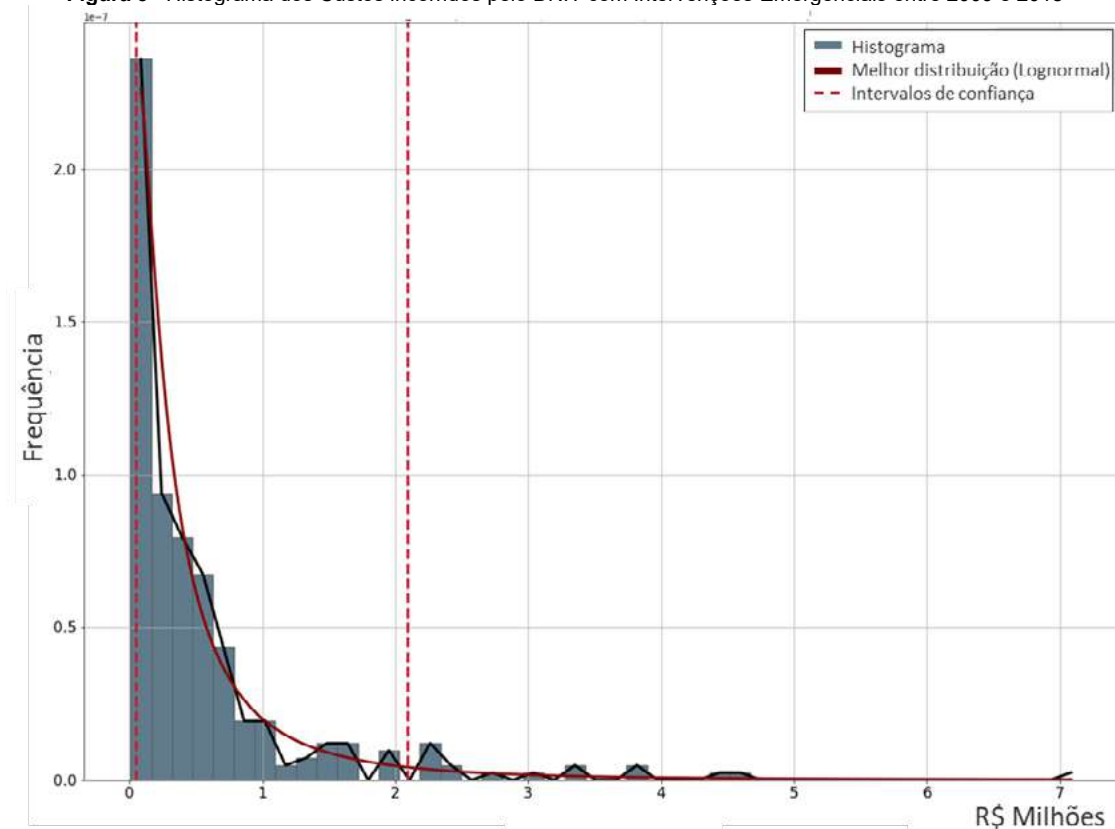
4.1 QUANTIFICAÇÃO DOS IMPACTOS

Com o auxílio da linguagem Python, biblioteca distfit, os valores dos 267 sinistros, já reajustados, foram testados contra 9 distribuições de probabilidade conhecidas, a saber Normal, Exponencial, Gamma, Pareto, Lognormal, Weibull, Beta, T de Student e Uniforme, de forma a ser possível determinar qual delas melhor representa o comportamento do custo de uma obra emergencial. Como parâmetro de decisão adotou-se o menor erro quadrático. A distribuição que melhor se adequou aos dados foi a Lognormal, com os parâmetros mostrados na Tabela 5 e curva de densidade de probabilidade apresentada na Figura 3.

Tabela 5 – Parâmetros da Função Lognormal para os custos de obras emergenciais

Parâmetro	Valor
Locação	15.018,0691
Escala	2.983.922,8162
Forma	1,1841

Fonte: Elaboração própria

Figura 3– Histograma dos Custos incorridos pelo DNIT com Intervenções Emergenciais entre 2009 e 2018

Fonte: Elaboração própria

4.2 PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE UM DESASTRE NATURAL

Como a classificação se apresentou em níveis e valores de prioridade de investimento, conforme critérios relacionados à ocorrência de desastres naturais e obras emergenciais, tornou-se possível utilizar esse resultado como partida para a determinação da probabilidade de ocorrência de um sinistro em um trecho no ano.

Primeiramente, determinou-se a quantidade de segmentos dentro de cada grupo. Isso foi feito de forma direta, a partir da Tabela 3. Em seguida,

foi levantada a quantidade de ocorrências em cada grupo entre os anos de 2009 e 2018, Tabela 4.

A partir dos valores presentes, foram calculadas as médias anuais, dividindo-se o resultado do passo anterior pelo tamanho do período de análise. Finalmente, esse valor ainda foi dividido pela quantidade de trechos dentro do grupo, obtendo-se a chance ou probabilidade anual de ocorrência de um desastre natural para a infraestrutura de cada categoria de risco. O procedimento pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 – Probabilidade de ocorrência de desastres naturais nos grupos de classificação

Prioridade	Extensão (km)	Quantidade de Ocorrências (2009-2018)	Probabilidade anual de ocorrência
Muito alta	964.2	105	1.089%
Alta	1929.7	40	0.207%
Média	6373.0	33	0.052%
Baixa	29517.1	49	0.017%
Muito baixa	23577.8	40	0.017%

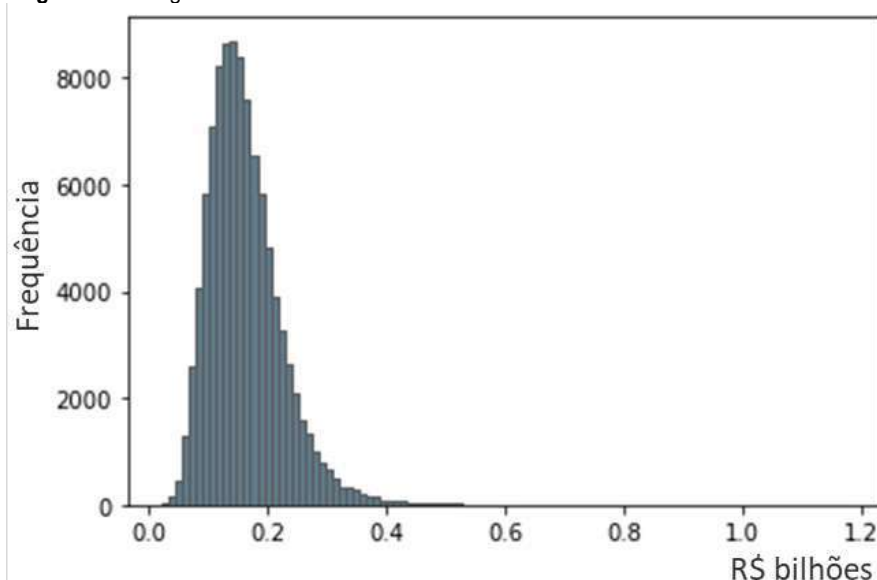
Fonte: Elaboração própria

4.3 CÁLCULO DO RISCO

Conforme mencionado anteriormente, obtém-se o risco por meio do produto entre a probabilidade de ocorrência e o impacto, como descrito na Equação 1. Tendo em vista que foi possível a determinação da distribuição de probabilidades que rege ambas as variáveis, é possível usar o método de Monte Carlo para calcular a curva de probabilidades do desembolso anual com obras emergenciais de deslizamento de encostas.

Foram feitas 100 mil simulações, para as quais subdividiu-se a malha rodoviária federal do DNIT em segmentos de 50m de extensão e calculou-se, conforme valores da Tabela 6 a probabilidade de aquele segmento ser alvo de um sinistro ambiental, dada sua classe de risco. Para aqueles segmentos em que a análise estatística indicou a ocorrência de deslizamento, calculou-se o valor de reparação do ocorrido a partir da distribuição lognormal determinada na seção 4.1. O histograma resultante dessa análise pode ser visto na Figura 4, e os percentis na Tabela 7.

Figura 4 – Histograma de risco com deslizamento de encostas na malha rodoviária do DNIT



Fonte: Elaboração própria

Tabela 7 – Risco anual (Milhões de R\$)

Percentil	Risco
Média	160.88
Desvio Padrão	62.76
Mínimo	20.66
10%	92.86
20%	110.33
30%	124.59
40%	137.94
50%	151.24
60%	165.40
70%	182.51
80%	204.22
90%	239.18
Máximo	1170.85

Fonte: Elaboração própria

Nota-se que pelo método QRA o risco representa um valor monetário, com unidade em reais, e não apenas uma probabilidade. Dessa forma, esse dado deve ser interpretado como a expectativa anual de gastos com remediação de desastres naturais em um trecho. Da Tabela 7 pode-se inferir que, em média, o gasto anual com obras de reparação de deslizamentos de massa é da ordem de R\$ 161 milhões. Isso significa dizer que, caso esse seja o valor da dotação orçamentária para esse tipo de investimento, em 1 a cada 2 anos espera-se que os recursos sejam insuficientes para fazer frente às obrigações emergenciais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O planejamento ótimo de recursos para a manutenção das rodovias necessita da estimativa, o valor que será gasto com esse tipo de intervenção. A cada ano, ocorrem em média 27 sinistros ambientais que impactam as rodovias federais, exigindo o empenho de recursos para sanar os danos causados. Para planejar adequadamente a necessidade de recursos para a manutenção das rodovias, é preciso, portanto, estimar o montante que será gasto com esse tipo de intervenção.

Para os cálculos do custo das obras de emergência foi considerado o histórico das ocorrências, convertido em uma distribuição de probabilidade representativa. Pontua-se aqui que o método apresenta a desvantagem de que os dados utilizados para a análise se basearem num curto período de 10 anos e apenas para os ativos rodoviários do DNIT, impossibilitando uma análise estatística mais apurada.

O crescimento do presente tema é fundamental, pois gera maior enriquecimento de informações e confiabilidade para análises futuras, aumentando a resiliência da malha rodoviária brasileira, visando garantir condições permanentes de trafegabilidade, segurança e conforto aos usuários.

Com base na análise realizada neste estudo, concluímos que a integração do mapa de susceptibilidade ao deslizamento de encostas fornecido pela NASA com os dados de ocorrências do DNIT tornou possível extrair informações quantitativas a partir da categorização qualitativa do mapa de susceptibilidade global ao deslizamento de massas, mostrando-se como uma abordagem promissora para a avaliação do risco anual de sinistros em ativos de infraestrutura.

A utilização da simulação Monte Carlo demonstrou ser uma ferramenta eficaz para quantificar o risco em termos financeiros. Essa metodologia permitiu a consideração de múltiplos cenários e a incorporação de incertezas associadas às variáveis-chave relacionadas à fragilidade das encostas e ao custo da obra de mitigação.

Finalmente, os autores sugerem que o modelo seja expandido de sorte a incorporar outros fatores de risco, tais como índices de precipitação acumulados diários e semanais. Sugere-se, ainda, que a abordagem aqui desenvolvida seja aplicada para a quantificação do risco geológico de concessões rodoviárias e ferroviárias, de forma a evitar desvios quando da elaboração dos respectivos modelos de negócios.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, B. C. P., FERRARI DE CAMPOS, D. J., COSTA, T. C. F., VIEIRA, S. S. (2019). **Metodologia de Avaliação Quantitativa de Risco para Determinação de Gastos com as Obras Emergenciais**. 21º ENACOR - Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, (p. 11), Brasília, DF.

BRASIL. Departamento nacional de infraestrutura de transportes (DNIT). (2016). **Monitoramento do plano nacional de manutenção rodoviária**: plano de adaptação de rodovias federais a desastres naturais e desastres naturais recorrentes. Florianópolis: UFSC; Brasília: DNIT. Termo de execução descentralizada n. 935/2014-00. (Relatório parcial, v. 2, 2R05).

BRASIL. **Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993**. Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 jun. 1993.

CALDEIRA, L. (2005). **Metodologias de Análise de Risco**. Aplicações em Geotecnia. II Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia: Modelação e Segurança em Geotecnia, (pp. 31-55).

ECKHARDT, R. (1987). **Stan Ulam, John von Neumann, and the Monte Carlo Method**. Los Alamos Science, Special Issue, 131 - 143.

GILTIRANA JR, G. F. (2005). **Weather-Related Geo-Hazard Assessment Model for Railway Embankment Stability**. Thesis Doctor. Department and Geological Engineering. University of Saskatchewan. Saskatoon, Saskatchewan, Canada. 411 p.

IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias. (2010). **Manual de sinalização de obras e emergências em rodovias**. IPR publicação nº 738, 2ª Edição. Rio de Janeiro. 218p.

KOTTEGODA, N., & ROSSO, R. (1997). **Statistics, probability, and reliability for civil and environmental engineers**. Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill Publishing Company.

MONTOYA, C. A. H. (2013). **Incertezas, vulnerabilidade e avaliação de risco devido a deslizamento em estradas**. Tese de Doutorado, Publicação T.TD 081/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 250p.

PALMIERI, F., & LARACH, J. O. (1996). **Pedologia e Geomorfologia. Em Geomorfologia e Meio Ambiente**. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 59-89.

SANTOS, R. N. (2006). **Enquadramento das Análises de Riscos em Geotecnia**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, PT.

STANLEY, T. A. & KIRSCHBAUM, D. B. (2017). **A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping**. Natural Hazards, pp. 1-20: 10.1007/s11069-017-2757-y.

STANLEY, T. A., KIRSCHBAUM, D. B., BENZ, G. (2021). **Data-Driven Landslide Nowcasting at the Global Scale**. Frontiers in Earth Science, 9: 10.3389/feart.2021.640043.

WALPOLE, R. E.; MYERS, R. H. **Probability and statistics for engineers and scientists**. Nova Iorque: Macmillan, 1978. 580 p.

ANÁLISE DA VIABILIDADE OPERACIONAL DE ESCAVADEIRAS HIDRÁULICAS PARA DRAGAGEM MECÂNICA DA HIDROVIA DO RIO TAQUARI

ANALYSIS OF THE OPERATIONAL FEASIBILITY OF HYDRAULIC EXCAVATORS FOR MECHANICAL DREDGING OF THE TAQUARI RIVER WATERWAY

Augusto Ayub - augusto.ayub@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0007-8272-8634>

Ariela da Silva Torres - ariela.torres@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0000-0003-4686-9759>

Paula Martins Machado - paula.machado@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0007-2020-3840>

RESUMO: O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é o responsável pela operação de dragagem em um trecho de 25 km do Rio Taquari, no estado do Rio Grande do Sul. Essa operação permite um canal de navegação com largura de 30 metros. Para garantir a segurança da navegação para embarcações com calado de até 2,5 m, a profundidade do canal deve ser de 3,5 m a partir do nível de redução. A região possui períodos de chuvas intensas, que determinam as cheias do rio e o aumento significativo, em poucas horas, do nível d'água. Em função das características fluviométricas, este estudo teve como objetivo analisar a potencialidade do uso de diferentes equipamentos, do tipo escavadeira, para utilização no Rio Taquari, comparando as profundidades máximas e mínimas do rio com as características físicas dos equipamentos. Além disso, o estudo estabeleceu um comparativo com o equipamento que está determinado na composição de custo do SICRO e utilizado no Termo de Referência do contrato de dragagem. Concluiu-se que a utilização de escavadeira com capacidade de escavação até 7,36 m em fundo nivelado é adequada e que o uso de um equipamento de menor porte, similar ao adotado na composição do SICRO, se demonstrou ineficiente. Por fim, demonstrou-se que é necessária revisão do fator de eficiência adotado no SICRO para dragagem no Rio Taquari.

PALAVRAS-CHAVE: dragagem mecânica; Rio Taquari; escavadeira hidráulica.

ABSTRACT: The Brazilian National Department of Transport Infrastructure (DNIT) is responsible for the dredging operation in a 25 km stretch of the Taquari River, in the state of Rio Grande do Sul. This operation allows a navigation channel with a width of 30 meters. To ensure navigation safety for vessels with 2.5 m draft, the channel depth, considering the reference plane, totals 3 m, adding 50 cm of tolerance, reaching 3.5 m of final channel depth considering the reference plane. The region has a typical rainy season, which determines the flooding of the river and the significant increase, in a few hours, of the water level. Due to the fluvimetric characteristics, this study aimed to analyze the potential use of different types of excavators for Taquari River dredging, comparing the maximum and minimum depths of the river with the physical characteristics of the equipment. In addition, the SICRO dredging equipment and the equipment defined by the Reference Term was compared. It was concluded that the use of an excavator with a digging capacity of up to 7.36 m on a leveled bottom is adequate and that

smaller equipment, similar to that adopted in the composition of the SICRO, proved to be inefficient. Finally, it was demonstrated that there is a need to review the efficiency factor adopted in SICRO for dredging in the Taquari River.

KEYWORDS: *mechanical dredging; Taquari River; hydraulic excavator.*

1 INTRODUÇÃO

O Rio Taquari faz parte da bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, que possui área de 26.430 km² (SEMA/RS, 2023). A porção navegável do rio vai desde sua foz, no Rio Jacuí, até o Porto de Estrela, totalizando 86,5 km de hidrovia navegável. Bombassaro e Robaina (2010, p. 85) descreveram os frequentes eventos de cheia do rio:

O comportamento topográfico da bacia, com uma amplitude máximas em torno 1000 metros, declividade superiores a 15%, em praticamente 90% da bacia, associados com solo pouco desenvolvido favorecem o escoamento superficial e a ocorrência de significativos eventos de inundações, especialmente no vale do rio Taquari, predominantes nos períodos de inverno e primavera.

[...]

Quando ocorrem períodos de chuvas intensas no alto curso forma-se uma onda de cheia, que tem resposta no canal principal, no vale do Taquari, de dois a três dias.

De acordo com Collischonn *et al.* (2020), a vazão do rio Taquari pode ultrapassar 12.000 m³/s e o nível da água pode subir até 15 metros em pouco mais de um dia. Além disso, em função das características da bacia hidrográfica (grande declividade e predominância de rochas basálticas), a velocidade de ascensão do hidrograma é extremamente alta. Conforme apontado por Eckhardt *et al.* (2009), a partir do nível de 19 m, inicia o estado de inundação das cidades ao redor do rio Taquari. Em julho de 2020, uma grande inundação atingiu as cidades da região, atingindo a marca de 27,39 m no linígrafo automático do Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE, 2020), instalado no Porto Fluvial de Estrela e mantido pela Agência Nacional das

Águas (ANA) e pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). A inundação de 09 de julho de 2020 é a quarta maior desde o início da série histórica e a maior nos últimos 64 anos, com tempo de retorno aproximado de 30 anos de acordo com os dados observados por Moraes (2015).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) executa a dragagem de manutenção da hidrovia do Rio Taquari em um segmento contínuo de 25 km, compreendido entre os km 96 e km 121. A dragagem possibilita a navegação para embarcações com calado de até 2,50 metros no canal de navegação com 30 metros de largura.

A calha do Rio Taquari possui cascalho de grande diâmetro, ultrapassando 10 cm, conforme demonstrado na Figura 1, o que impede a realização de dragagem hidráulica com draga de sucção e recalque ou draga Hopper. Historicamente, a dragagem do rio foi realizada com utilização de draga de alcatruzes, também conhecida como *bucket dredge*, guindaste com *clamshell* ou escavadeira hidráulica sobre plataforma flutuante, sempre com apoio de batelão para transporte do material dragado. A solução atualmente utilizada para dragagem é a escavadeira hidráulica sobre plataforma flutuante.

A utilização de escavadeira hidráulica, que possui alcance de escavação limitado pelo comprimento da lança e do braço, torna a continuidade da operação suscetível às constantes variações de nível do rio. Por esse motivo, a escolha de equipamento adequado é crucial para o sucesso do empreendimento.

Figura 1 – Material oriundo da dragagem do Rio Taquari

Fonte: Elaboração própria

De acordo com Goes Filho (1979), a escolha das dragas e dos equipamentos de dragagem é complexa e determinada pelas condições fisiográficas da área que requer a intervenção. Os principais tópicos a serem analisados, quando da escolha dos equipamentos, são os seguintes:

- características físicas do material a ser dragado;
- volume do material a ser dragado;
- distância da área de despejo do material;
- condições ambientais da área a ser dragada e da área de despejo;
- agitação do nível d'água;
- nível de contaminação dos sedimentos a serem dragados;
- método do despejo do material dragado;
- produção estimada dos equipamentos empregados;
- tipo de equipamentos disponíveis.

Dentre os equipamentos utilizados em atividades de desassoreamento e dragagem de arroios urbanos, o mais comumente encontrado é a draga escavadeira de braço longo.

A escavadeira de braço longo, também conhecida por escavadeira *long reach*, é ideal para limpeza de rios, açudes, canais, córregos e dragagens que necessitam de maior alcance e

escavações profundas. É um equipamento que permite o trabalho de escavações de até 12 metros de profundidade com total agilidade e segurança, além de ser extremamente versátil, fácil de transportar e, principalmente, de grande produtividade (LF Ambiental, 2023).

Dentre os benefícios do uso de escavadeiras de braço longo para uma obra cita-se o maior alcance nas escavações, devido ao tamanho do braço da escavadeira, que possibilita atingir maiores distâncias; a escavação de maiores profundidades, em maior escala ou escavações mais largas; maior estabilidade da escavadeira de braço longo em terrenos inclinados, escorregadios e irregulares; e robustez e força, pois as escavadeiras braço longo aguentam mais peso por mais tempo.

Porém, o uso de escavadeiras de braço longo deve ser previsto de acordo com o local da dragagem, levando em consideração as características do canal de navegação e as questões fluviométricas da região, para se eleger um equipamento com maior eficácia.

2 OBJETIVO

A presente análise busca verificar a viabilidade operacional de diversos modelos de escavadeiras hidráulicas para dragagem

mecânica no Rio Taquari. A análise se limita a verificar o alcance das escavadeiras considerando o histórico de níveis do rio nos últimos 20 anos.

3 METODOLOGIA

Este estudo iniciou com a análise do projeto de dragagem do canal da hidrovia e a avaliação da metodologia de execução atualmente utilizada. Os dados da geometria do canal, níveis de redução e forma de execução foram obtidos dos contratos firmados pelo DNIT para execução dos serviços, uma vez que não há projeto formal da hidrovia.

Também foi analisada a composição de custo fornecida no Termo de Referência (TR) do contrato de dragagem do Rio Taquari, baseada no Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), utilizado pelo DNIT para elaboração do cronograma financeiro do contrato.

Os dados fluviométricos do rio foram obtidos no sistema HIDROWEB, da Agência Nacional de Águas (ANA). A análise se limitou à estação 86895000 – Porto Mariante, localizada próxima ao meio do segmento de 25 km de dragagem. Foram analisadas medições de nível médias diárias de 01/11/2002 até 31/10/2022, totalizando 20 anos de dados. Os dados faltantes foram preenchidos por interpolação linear utilizando os dados disponíveis do dia anterior e posterior. A utilização da interpolação linear se justifica em razão do fato de que as variações de nível no Rio Taquari ocorrem no período de alguns dias, não sendo observados picos com retorno ao nível inicial no mesmo dia. Observou-se 23 medições diárias faltantes em um universo de 7.305 medições diárias, que representam 0,32 % do total.

As informações dos equipamentos do tipo escavadeiras hidráulicas para dragagem foram obtidas nos cadernos de especificações técnicas dos produtos de uma empresa que comercializa

esse tipo de equipamentos. Todas as escavadeiras indicadas como médias e grandes foram analisadas, totalizando 13 equipamentos distintos. Em todos os casos, foram utilizadas as configurações padrão indicadas nos cadernos de especificações.

A análise da viabilidade operacional dos equipamentos levou em consideração o projeto de dragagem, os dados fluviométricos e a especificação dos equipamentos, sendo avaliada a viabilidade de utilização de cada um dos equipamentos em função do seu alcance para escavação.

Para a verificação da viabilidade da utilização do equipamento em função do nível do rio, foram adotadas as seguintes considerações:

- a altura do pontão acima do nível d'água é de 80 cm;
- a escavação é realizada até o final da tolerância, resultando em uma profundidade de escavação de 3,50 m abaixo do nível de redução;
- o nível de redução junto à estação Porto Mariante é 80 cm;
- o alcance do equipamento é definido pela profundidade máxima de escavação com fundo nivelado de 2,44 m. A utilização da profundidade máxima de escavação como critério de alcance não se mostra viável, uma vez que esta exigiria o reposicionamento constante do comboio de dragagem.

Os resultados foram apresentados em percentual do tempo em que o equipamento teria condições de operar, obtendo-se resultados anuais e mensais, de forma a possibilitar o planejamento das campanhas de dragagem nos meses mais favoráveis.

4 RESULTADOS

Inicialmente, avaliou-se o projeto de dragagem e os dados fluviométricos e, em

seguida, ocorreu a avaliação da viabilidade dos equipamentos que poderiam ser utilizados para dragagem do Rio Taquari.

4.1 O PROJETO DE DRAGAGEM

O segmento de 25 km da hidrovia do Rio Taquari, no Estado do Rio Grande do Sul, onde é realizada a operação de dragagem, se inicia próximo à cidade de Taquari, no km 96, e termina na Eclusa de Bom Retiro do Sul, no km 121. A Figura 2 indica o local dos serviços.

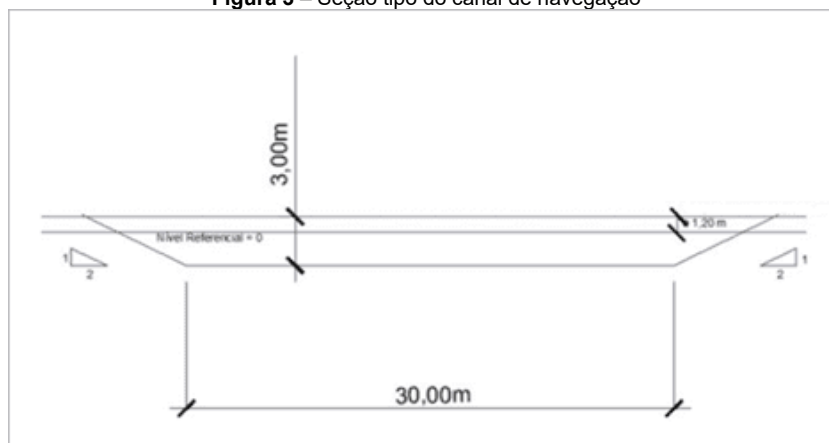
O canal de navegação possui largura de 30 m e taludes com inclinação de 1:2, conforme detalhado na Figura 3. Para garantir a navegação de embarcações com calado de 2,5 m, a profundidade do canal, a partir do nível de redução da hidrovia, totaliza 3 metros, já inclusa a folga (pé de piloto) de 50 cm. Adicionalmente, é permitida a tolerância de mais 50 cm. Nessa condição, a profundidade escavada a partir do nível de redução totaliza 3,5 m.

Figura 2 – Segmento com intervenção de dragagem



Fonte: Elaboração própria

Figura 3 – Seção tipo do canal de navegação



Fonte: Termo de Referência do Edital Pregão Eletrônico n° 0375/2020-10

O nível de redução do canal de navegação varia de 1,20 m, no km 121, até 0,50 m, no km 96. Na localidade da estação fluviométrica de Porto Mariante, objeto desta análise, o nível de redução é 0,80 m.

Conforme consta no caderno técnico de dragagem do DNIT (2022), a atividade de dragagem com escavadeira hidráulica sobre plataforma flutuante envolve a utilização dos seguintes equipamentos: escavadeira hidráulica,

plataforma flutuante, batelão sem propulsão e rebocador.

A composição de custo equivalente no SICRO, código 1901608, para o Estado do Rio Grande do Sul, representada na Figura 4, denominada “Dragagem de material de 1ª categoria com escavadeira hidráulica sobre pontão flutuante - capacidade da caçamba de 1,56 m³ - transporte com batelão sem propulsão

com capacidade de 100 t - DMT 300 a 600 m”, especifica a escavadeira código E9515 (Figura 5), descrita como “Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,5 m³ - 110 kW”. Todas as demais composições de custos para essa solução utilizam os mesmos equipamentos, havendo variação apenas na distância média de transporte (DMT) para descarga do material dragado.

Figura 4 – Composição de custo 1901608

Figura 4 – Composição de custo 1901608

CGCIT		DNIT					
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO				Rio Grande do Sul			
Custo Unitário de Referência				Janeiro/2023		Produção da equipe 84,24 m³	
1901608 Dragagem de material de 1ª categoria com escavadeira hidráulica sobre pontão flutuante - capacidade da caçamba de 1,56 m³ - transporte com batelão sem propulsão com capacidade de 100 t - DMT 300 a 600 m						Valores em reais (R\$)	
A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total	
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo		
E9057 Batelão sem propulsão com capacidade de 66 m³	2,00000	0,94	0,06	30,2816	27,1845	60,1915	
E9009 Embarcação rebocadora - 268 kW	2,00000	0,94	0,06	436,3785	145,7509	837,8817	
E9515 Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m³ - 118 kW	1,00000	1,00	0,00	324,9592	148,4464	324,9592	
E9058 Plataforma flutuante de 12 x 24 x 1,8 m com capacidade de 150 t	1,00000	1,00	0,00	42,8101	33,5471	42,8101	
				Custo horário total de equipamentos		1.265,8425	
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade		Custo Horário		Custo Horário Total	
				Custo horário total de mão de obra		1.265,8425	
				Custo horário total de execução		1.265,8425	
				Custo unitário de execução		15,0266	
				Custo do FIC		-	
				Custo do FIT		-	
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade		Preço Unitário		Custo Unitário	
				Custo unitário total de material			
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade		Custo Unitário		Custo Unitário	
				Custo total de atividades auxiliares			
				Subtotal		15,0266	
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade		Unidade		Custo Unitário	
				Custo unitário total de tempo fixo			
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade		DMT		Custo Unitário	
				LN	RP	P	
				Custo unitário total de transporte			
				Custo unitário direto total		15,03	
Obs:							

Fonte: SICRO (2023)

Figura 5 – E9515 - Escavadeira hidráulica sobre esteira com caçamba com capacidade de 1,5 m³ - 110 kW

Finalidade: Escavação de material em obras de terraplenagem ou de saneamento

Dados:

- Capacidade (m³): 1,50
- Largura (m): 2,98
- Comprimento (m): 9,46
- Altura (m): 3,28
- Peso (kg): 24.000,00
- Vida Útil (anos): 5,00
- HTA (h/ano): 2.000,00
- Potência (kW): 110,00
- Valor Residual (%): 30,00
- Coeficiente de Manutenção (K): 0,70
- Coeficiente de Combustível (l/kWh): 0,18
- Tipo de Combustível: Diesel
- Seguro (%): -
- IPVA (%): -
- Operação:
 - 1 Operador de equipamento pesado

Referência: 323 D L - Caterpillar

Fonte: Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes Volume 03 - Equipamentos

A metodologia de execução consiste na remoção do material submerso pela escavadeira posicionada sobre a plataforma flutuante. Simultaneamente à remoção do material, é

realizada a carga no batelão. Após o término da carga, o batelão é deslocado pela embarcação rebocadora até o local de descarga, próximo à margem do rio. A descarga é realizada através da

abertura das portas de fundo do batelão. Para garantir a continuidade da operação durante a atividade de descarga, é prevista a utilização de 2 batelões simultaneamente.

4.2 DADOS FLUVIOMÉTRICOS – ESTAÇÃO PORTO MARIANTE

Foram analisados os dados de nível na estação Porto Mariante obtidos no sistema HIDROWEB da ANA. O período analisado foi de 01/11/2002 até 31/10/2022, totalizando 20 anos de dados. Os dados obtidos são apresentados

com duas medições diárias, às 07:00 e às 17:00, e como média diária. Na presente análise foram utilizados os dados de média diária.

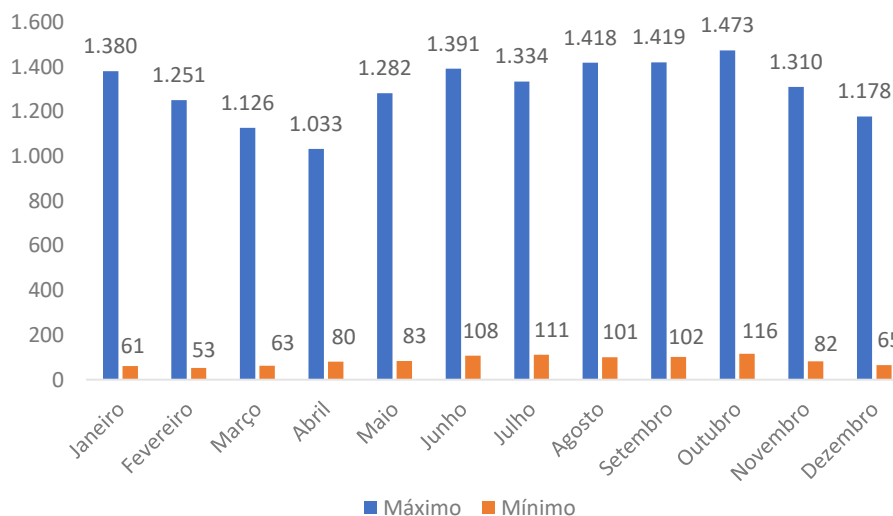
A Tabela 1 apresenta o resumo dos dados analisados. Foram compilados os níveis médios para cada mês nos 20 anos analisados, assim como os níveis máximos e mínimo medidos. A coluna de quantidade de medições indica o número de dados obtidos para cada mês. A Figura 6 apresenta, graficamente, os valores médios de máximos e mínimos, onde nota-se que o período de agosto a outubro apresentou os maiores picos.

Tabela 1 – Dados fluviométricos (níveis em cm)

Mês	Máximo	Mínimo	Média	Quantidade de medições
Janeiro	1.380,00	61,00	216,22	620
Fevereiro	1.251,00	53,00	196,84	565
Março	1.126,00	63,00	210,75	620
Abril	1.033,00	80,00	210,64	600
Maio	1.282,00	83,00	267,14	620
Junho	1.391,00	108,00	322,32	600
Julho	1.334,00	111,00	372,93	620
Agosto	1.418,00	101,00	308,49	620
Setembro	1.419,00	102,00	361,61	600
Outubro	1.473,00	116,00	363,83	620
Novembro	1.310,00	82,00	296,56	600
Dezembro	1.178,00	65,00	228,04	620
Total Geral	1.473,00	53,00	280,04	7.305

Fonte: Elaboração própria

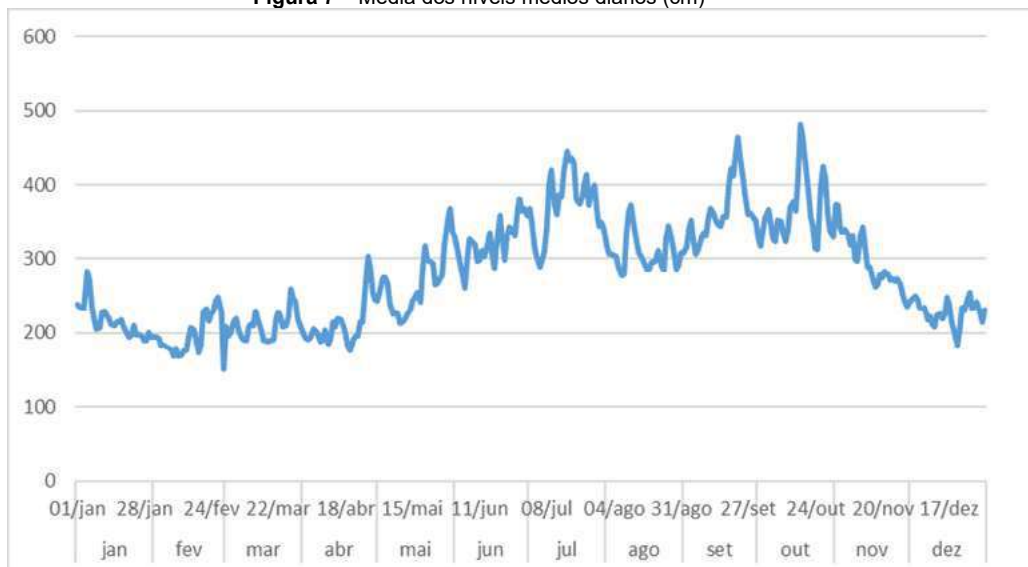
Figura 6 – Média de Máximos e Mínimos (cm)



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 7 foi plotado, com resolução diária, o nível médio para cada dia do ano. É possível observar que os níveis médios começam a se elevar no mês de maio, se mantendo altos durante o inverno e parte da primavera. A tendência de baixa começa no mês de novembro.

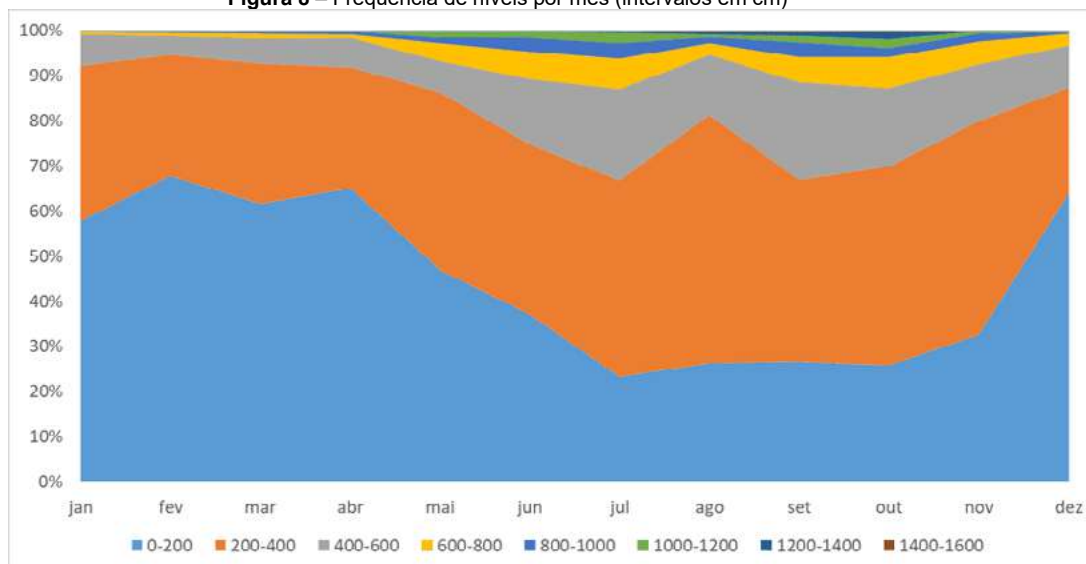
Figura 7 – Média dos níveis médios diários (cm)



Fonte: Elaboração própria

Essa conclusão é confirmada pela Figura 8, que demonstra a frequência dos níveis na estação para cada mês, nos anos analisados. Os níveis foram divididos em faixas de frequência de 200 cm, representadas pelas diferentes cores.

Figura 8 – Frequência de níveis por mês (intervalos em cm)



Fonte: Elaboração própria

4.3 EQUIPAMENTOS ANALISADOS

A amostra contou com 13 escavadeiras, de porte médio e grande, fabricadas pela mesma empresa. As informações foram obtidas dos

cadernos técnicos disponibilizados pelo fabricante, sendo sempre adotadas as configurações padrão indicadas. A potência dos equipamentos varia de 107 kW a 404 kW e o peso operacional varia de 20,3 t a 94,1 t.

O resumo dos equipamentos analisados e suas principais especificações constam na Tabela 2, sendo as duas últimas colunas: a profundidade máxima de alcance da escavadeira (Prof. Máx.

Esc.) e a profundidade máxima de escavação com fundo nivelado de 2,44 m (Prof. Máx. Fund. Niv.).

Tabela 2 – Resumo dos equipamentos analisados

Modelo	Potência Líquida (kW)	Vel. De Giro (rpm)	Peso Operacional (kg)	Lança (m)	Braço (m)	Caçamba (m³)	Prof. Máx. Esc. (m)	Prof. Máx. Fund. Niv. 2,44m (m)
320 GC	107,00	11,30	20.300,00	5,70	2,90	1,00	6,63	6,46
320 Tier 3	117,00	11,25	21.300,00	5,70	2,90	1,19	6,72	6,55
323 Tier 3	117,00	11,25	24.600,00	5,70	2,90	1,30	6,73	6,56
326	158,00	10,50	25.700,00	9,50	2,95	1,54	6,82	6,65
330 GC	157,80	11,50	28.000,00	6,15	3,20	1,60	7,26	7,10
330 Tier 3	195,00	11,50	31.400,00	6,15	3,20	1,80	7,25	7,09
336	232,00	8,75	35.900,00	6,50	3,20	1,88	7,52	7,36
345 GC	258,00	8,27	42.200,00	6,90	2,90	2,41	7,20	7,04
349	302,00	8,44	47.500,00	6,90	3,35	2,41	7,70	6,95
350	309,00	7,94	47.600,00	6,90	3,35	2,70	7,69	7,55
352	302,20	8,30	49.900,00	6,55	3,00	3,21	7,27	7,12
374 Tier 3	358,00	6,50	74.000,00	7,00	2,87	4,40	7,66	7,08
395 Tier 3	404,00	6,30	94.100,00	7,25	2,92	6,50	7,19	7,05

Fonte: Elaboração própria

Verifica-se que a escavadeira especificada no SICRO possui potência e peso operacional similar aos modelos 320 Tier 3 e 323 Tier 3. Porém, a caçamba de 1,5 m³, no modelo do SICRO, é superior em volume aos modelos de equipamentos analisados. Essa diferença no volume da caçamba prejudica a produtividade da operação de dragagem, não sendo adequado para atingir as metas estipuladas no TR. Já o modelo 326 tem peso e caçamba aproximados aos da composição do SICRO, porém, com potência bem superior (158 kW).

4.4 VIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS

Após cruzamento dos dados fluviométricos com as especificações dos equipamentos, foi elaborada a Tabela 3, que indica o percentual de dias, nos 20 anos analisados, nos quais seria viável a execução de dragagem em função do nível do rio. Os dados estão demonstrados por

equipamento, para o ano inteiro e para cada mês.

A análise dos dados mostrou que a escavadeira modelo 350 possui a maior disponibilidade em função do alcance para escavação, sendo possível produzir em 82,44% dos dias do ano, chegando a 94,69% dos dias de fevereiro. Porém, trata-se de escavadeira de grande porte, com potência de 309 kW, peso operacional de 47,6 t e caçamba de 2,7 m³, muito superior à escavadeira indicada no SICRO.

O segundo equipamento com melhor aproveitamento é o modelo 336, que permite produção em 80,45 % dos dias do ano. Esse equipamento tem potência de 232 kW, peso operacional 35,9 t e caçamba de 1,88 m³, mais próximo ao equipamento indicado no SICRO. Portanto, trata-se de boa alternativa de equipamento para dragagem mecânica do Rio Taquari.

Tabela 3 – Percentual dos dias viáveis para dragagem por equipamento

Modelo	% dos dias operacionais Ano inteiro	jan.	fev.	mar.	abr.	mai.	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.
320 GC	67,73%	78,55%	86,37%	82,26%	82,50%	70,48%	62,00%	44,68%	61,94%	52,00%	51,61%	63,17%	78,55%
320 Tier 3	69,21%	80,48%	87,26%	83,71%	83,00%	72,26%	62,83%	46,13%	63,71%	54,50%	53,06%	65,17%	79,68%
323 Tier 3	69,34%	80,48%	87,43%	83,71%	83,00%	72,26%	62,83%	46,45%	64,19%	54,50%	53,23%	65,33%	79,84%
326	70,64%	81,45%	88,14%	84,68%	83,83%	73,71%	64,50%	48,55%	66,45%	55,50%	54,68%	67,17%	80,16%
330 GC	77,40%	88,55%	92,57%	89,68%	89,17%	81,45%	69,83%	59,84%	74,68%	61,33%	63,39%	75,00%	84,19%
330 Tier 3	77,17%	88,39%	92,57%	89,68%	89,17%	81,29%	69,67%	59,35%	74,52%	61,33%	62,90%	74,17%	83,87%
336	80,45%	91,45%	93,81%	91,45%	90,83%	84,84%	72,17%	64,84%	78,87%	65,00%	67,90%	78,67%	86,29%
345 GC	76,43%	87,74%	91,68%	89,19%	88,83%	80,81%	69,17%	58,06%	73,23%	60,17%	62,26%	73,33%	83,55%
349	75,35%	86,29%	91,33%	87,90%	88,17%	79,35%	67,83%	56,77%	72,58%	59,83%	60,81%	71,33%	82,90%
350	82,44%	92,58%	94,69%	92,74%	91,83%	86,61%	75,17%	67,42%	82,26%	67,83%	70,48%	80,67%	87,58%
352	77,75%	88,87%	92,57%	89,84%	89,50%	81,61%	70,17%	60,48%	75,65%	61,67%	63,39%	75,83%	84,35%
374 Tier 3	77,07%	88,39%	92,57%	89,52%	89,17%	81,29%	69,67%	59,19%	74,35%	61,17%	62,90%	73,83%	83,71%
395 Tier 3	76,61%	87,90%	91,86%	89,35%	88,83%	81,13%	69,50%	58,06%	73,87%	60,50%	62,26%	73,33%	83,55%

Fonte: Elaboração própria

O equipamento indicado na composição do SICRO, similar aos modelos 320 Tier 3 e 323 Tier 3, possui aproveitamento em apenas 69% dos dias do ano. Desta forma, o equipamento não é o mais adequado para esta atividade. O modelo 326 apresentou 70,64% de aproveitamento, sendo o período entre junho a novembro o mais crítico. Portanto, estes 3 modelos (320 Tier 3, 323 Tier 3 e 326) têm baixa produtividade, visto que os 5 meses do ano anteriormente referenciados apresentam os maiores picos da água, o que impossibilita a operação de dragagem pelo tipo de equipamento escolhido.

4.5 FATOR DE EFICIÊNCIA DO COMBOIO DE DRAGAGEM

A metodologia de cálculo da produtividade da atividade é definida pelo DNIT (2022) no Caderno Técnico de Dragagem do SICRO. Este indica que o fator de eficiência da escavadeira hidráulica sobre plataforma flutuante é igual a 0,75, utilizado em todas as composições deste tipo de serviço.

O fator de eficiência é definido no SICRO como sendo a “relação entre o tempo de produção efetiva e o tempo de produção nominal de

determinado equipamento”. Esse fator contempla os tempos em que o equipamento não está efetivamente produzindo, como quando há deslocamento das equipes, preparação das máquinas, atividades de manutenção, entre outros.

Ocorre que, conforme verificado neste estudo, levando em consideração apenas a indisponibilidade das atividades em função do nível do rio, para o equipamento referencial da composição de custo, o tempo disponível para dragagem é em torno de 69%, sendo que os meses mais críticos de julho, setembro e outubro apresentam tempo útil abaixo de 55%. Deve-se considerar, ainda, os tempos de deslocamento entre pontos críticos, posicionamento do comboio, manutenção dos equipamentos e outros fatores similares, o que reduziria o fator de eficiência ainda mais, mas resultaria em um fator de eficiência mais coerente com a operação que está sendo realizada.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou que, para o caso específico da dragagem com escavadeira do Rio

Taquari, a utilização de escavadeira com capacidade de escavação até 7,36 m em fundo nivelado é adequada. A utilização de equipamento de menor porte, similar ao adotado na composição do SICRO, se demonstrou ineficiente devido ao elevado número de dias nos quais não seria possível a execução dos serviços.

Adicionalmente, verificou-se que o fator de eficiência adotado no SICRO (0,75) está superestimado, o que resulta em produtividade superior àquela que poderá ser obtida em campo

e, consequentemente, custos estimados inferiores aos reais. Essa consequência é ainda mais relevante se considerado o equipamento de menor porte adotado por padrão na composição do SICRO. Dessa forma, conclui-se que é necessária a alteração do fator de eficiência do comboio de dragagem para adequação às condições específicas do Rio Taquari, sendo também necessário verificar a eficiência do serviço em função do tamanho da caçamba.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Sistema Hidroweb v3.2.7**. Site ANA. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 02 maio 2023.
- BOMBASSARO, M.; ROBAINA, L. E. de S. **Contribuição Geográfica para o Estudo das Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS**. Revista Geografias. Belo Horizonte - MG, 2010.
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; MORAES, S. R.; GIACOMELLI, L. V. Z.; SIQUEIRA, V. A. **ANÁLISE DA ANTECEDÊNCIA MÍNIMA NECESSÁRIA PARA PREVISÕES DE INUNDAÇÕES EM LAJEADO NO RIO TAQUARI (RS)**. In: II Encontro Nacional de Desastres (II END), 2020, Rio de Janeiro. Anais do II Encontro Nacional de Desastres (II END). Porto Alegre - RS: ABRHidro, 2020.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2022). **Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO. Caderno Técnico Dragagem**. Site DNIT. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro/cadernos-tecnicos/g19-dragagem-1.zip>. Acesso em: 01 maio 2023.
- ECKHARDT, R. R. HAETINGER, C. SALDANHA, D. L. FERREIRA, E. R. FAVA E SILVA, J. DIEFRICH, V. L. **Previsão e Mapeamento da Área Urbana Inundável na Cidade de Lajeado - RS – Brasil**. In: *VI International Conference on Engineering and Computer Education (ICECE)*, Buenos Aires, Argentina, 2009.
- GOES FILHO, H. A. **Planejamento de Dragagem**. In: Boletim Técnico da Associação Latino-Americana de Dragagem, n. 2, p. 9-20, dez. 1979.
- LF AMBIENTAL. **Escavadeiras Braço Longo**. In: LF Ambiental. Disponível em: <https://www.lfambiental.com.br/locacao/escavadeiras-braco-longo>. Acesso em: 23 maio 2023.
- MORAES, S. R. **Mapeamento das áreas e edificações atingidas pelas inundações do Rio Taquari na área urbana do município de Lajeado/RS**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, Rio Grande do Sul, 2015.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL – SEMA/RS. **Dados Gerais das Bacias - G040 - Rio Taquari-Antas**. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/g040-bh-taquari-antas>. Acesso em: 01 maio 2023.

IMPLEMENTAÇÃO DE FORMULÁRIOS PADRÃO – PASSO INICIAL PARA A FORMAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS DE OBRAS E PROJETOS NO DNIT

IMPLEMENTATION OF STANDARD FORMS – INITIAL STEP TO CREATE A DATABASE OF WORKS AND PROJECTS IN DNIT

Nelson Wargha Filho - nelson.wargha@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0000-9366-4620>

Emmanuelle Stefânia Holdefer Garcia - emmanuellegarcia@ste-simemp.com.br - <https://orcid.org/0000-0002-8964-2645>

Amanda Menezes Ricardo - amandaricardo@ste-simemp.com.br - <https://orcid.org/0009-0005-5979-0865>

Henrique Petisco de Souza - henriquesouza@ste-simemp.com.br - <https://orcid.org/0000-0002-1625-2531>

Alex Duarte de Oliveira - alexoliveira@ste-simemp.com.br - <https://orcid.org/0009-0001-5368-9476>

RESUMO: O DNIT realiza anualmente uma série de projetos e obras em suas rodovias, buscando garantir uma boa condição de trafegabilidade e segurança aos usuários. Os relatórios desses empreendimentos, contendo os estudos realizados, são encaminhados pelas contratadas, através de formulários com *layout* próprio da empresa responsável. Apesar de atenderem de forma adequada ao empreendimento específico, verifica-se que ausência de padronização em formulários, traz, a médio e longo prazo, alguns desafios para esta Autarquia. Com a implementação do novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), se faz ainda mais premente a necessidade da formação de um robusto banco de dados para os ajustes contínuos na calibração do método e, para isso, é essencial a padronização de entrega dos dados. Verifica-se que, em alguns Órgãos Rodoviários, essa padronização já foi implementada. Buscou-se, assim, apresentar uma proposta de elaboração de formulários padrão no DNIT, como um passo inicial para a criação de um banco de dados organizado de empreendimentos realizados. Entende-se que a implementação de tal ação é relativamente simples e pode promover ganhos significativos em termos de acompanhamento, avaliação de obras e materiais, além de facilitar a tomada de decisões por parte de gestores.

PALAVRAS-CHAVE: formulários; banco de dados; obras rodoviárias.

ABSTRACT: *The National Department of Transport Infrastructure (DNIT) carries out a series of projects and works on its highways annually, seeking to ensure good conditions of trafficability and safety for users. The contractors, through forms with the company's own layout, forward reports of these undertakings, containing the studies carried out. Although they adequately serve for the specific enterprise, it appears that the lack of forms standard brings, in the medium and long term, some challenges for this Government Company. With the implementation of the new mechanistic empiric method, the necessity to form a robust database in order to the continuous adjustments in the calibration's method becomes even more relevant and, for this reason, it is essential to promote a creation of standard forms. It appears that, in some Highway Agencies, this pattern has already been implemented. Thus, this paper aims to present a proposal for the elaboration of standard forms in DNIT, as an initial step towards the creation of an organized database of its enterprises. It is possible to see*

that the implementation of such action is relatively simple and can promote significant gains in terms of monitoring, evaluation of works and materials, in addition to facilitating decision-making by managers.

KEYWORDS: *forms; database; road works.*

1 INTRODUÇÃO

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Órgão Executivo do Governo Federal, responsável pela implantação, restauração e manutenção da malha rodoviária nacional, executa anualmente uma série de projetos e obras em todo o país, buscando garantir uma boa condição de trafegabilidade e segurança aos usuários de rodovias sob sua jurisdição.

Durante a implementação de tais ações, sejam elas relacionadas à elaboração de projetos ou à execução de obras, uma significativa quantidade de estudos deve ser realizada. Por envolverem diferentes tipos de materiais e de processos, os estudos são segmentados para que todas as variáveis sejam detalhadas e validadas. No que se refere à pavimentação, todos os materiais que compõem as diversas camadas do pavimento devem ser devidamente caracterizados. Os documentos normativos do DNIT norteiam essa caracterização, definindo os parâmetros a serem obtidos para que os materiais possam ser aplicados nas rodovias federais.

Para a verificação das atividades de caracterização de materiais ou levantamentos realizados, cada empresa contratada pelo DNIT entrega os relatórios de projetos ou obras, que deverão passar por análise da fiscalização por parte da autarquia. Observa-se que, de forma geral, as empresas possuem *layout* próprio para os formulários que são inseridos nesses relatórios. Se os mesmos estiverem conformes, o relatório será aprovado e a contratada dará continuidade ao serviço. Verifica-se, assim, que não há qualquer prejuízo momentâneo na

utilização de formulários personalizados pelas empresas contratadas, desde que estes atendam às exigências do Órgão. Ocorre, porém, que a falta de padronização dos já referidos formulários traz, a médio e longo prazos, alguns obstáculos para a criação de um banco de dados no DNIT, além de dificultar comparações expeditas entre parâmetros de um e outro empreendimento ou mesmo de serviços realizados em mesmo segmento em diferentes períodos de execução.

Com a implementação do novo Método de Dimensionamento Nacional - MeDiNa, que se encontra em curso, se faz ainda mais premente a necessidade de um robusto banco de dados para realização de ajustes contínuos na calibração do método.

Com o propósito de suprir lacunas, reduzir equívocos e possibilitar a formação de um banco de dados, apresenta-se a proposta de implementação de formulários padronizados a serem adotados por empresas contratadas. Tais formulários serão automaticamente validados, facilitando a análise da fiscalização e aumentando a confiabilidade dos empreendimentos rodoviários dentro dos princípios da impessoalidade, publicidade e eficiência, que regem a gestão pública brasileira. Aprimoramentos, como a criação de um sistema computacional em que haja a disponibilização *on-line* dos formulários também devem ser considerados, tal como ocorre no Sistema de Supervisão Rodoviária Avançada (SUPRA). Essa ação, de implementação relativamente simples, trará resultados importantes na melhoria de avaliação de obras e projetos, na gestão de empreendimentos e no avanço de pesquisas de

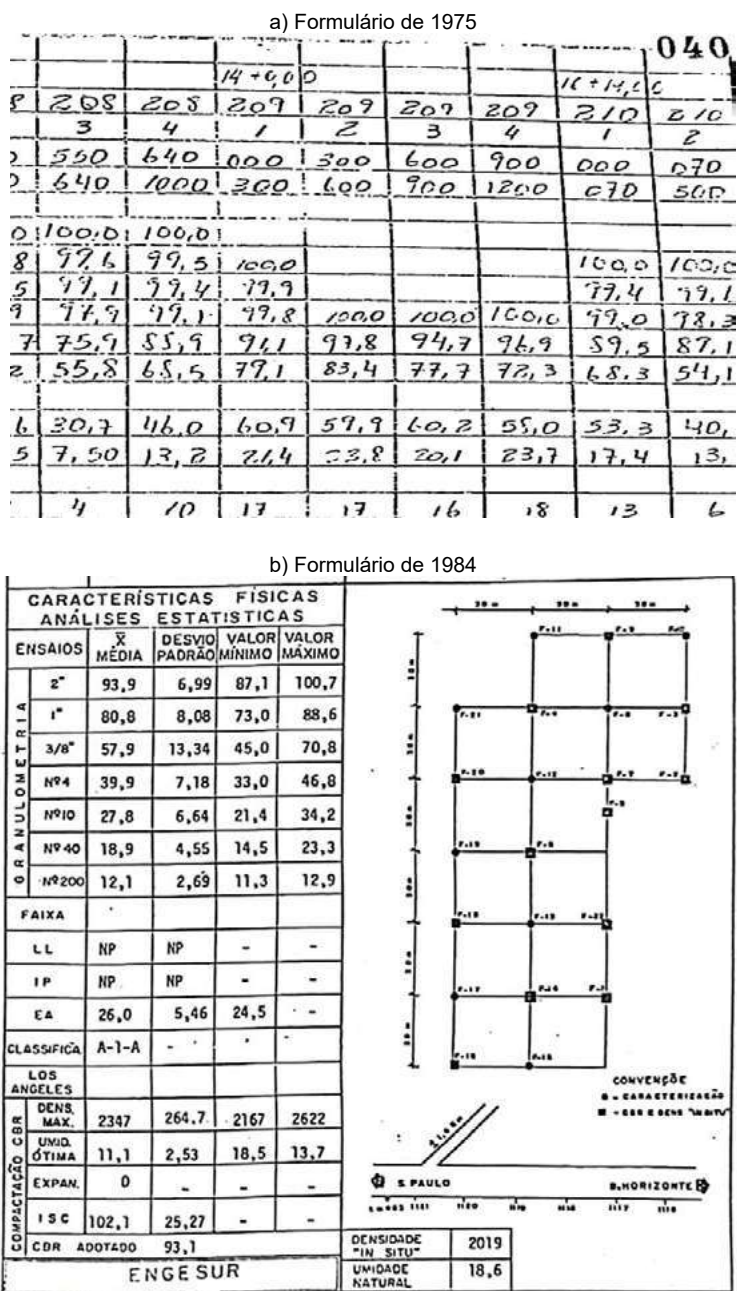
materiais e de serviços no DNIT.

2 JUSTIFICATIVAS PARA A CRIAÇÃO DE FORMULÁRIOS PADRÃO

O extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) possuía em seu acervo técnico formulários, que eram extensivamente utilizados por empresas que prestavam serviço na Autarquia. As fichas, com preenchimento manual

(Figura 1a) pelas construtoras, supervisoras e projetistas, eram reproduzidas nos projetos e relatórios encaminhados ao Órgão. O aprimoramento destes formulários pode ser visualizado ao longo do tempo, sendo que, em 1984 (Figura 1b), por exemplo, já não se apresentavam formulários preenchidos de forma manual.

Figura 1 – Exemplo de formulários de estudos geotécnicos



Fonte: Acervo técnico do DNIT

Com o advento da informática, as empresas passaram a utilizar formulários automatizados, que realizam cálculos e geram gráficos de maneira simples, além de proporcionar uma maior qualidade da apresentação de dados e relatórios (Figura 2).

Figura 2 – Exemplo digital de dados de estudos para obras rodoviárias

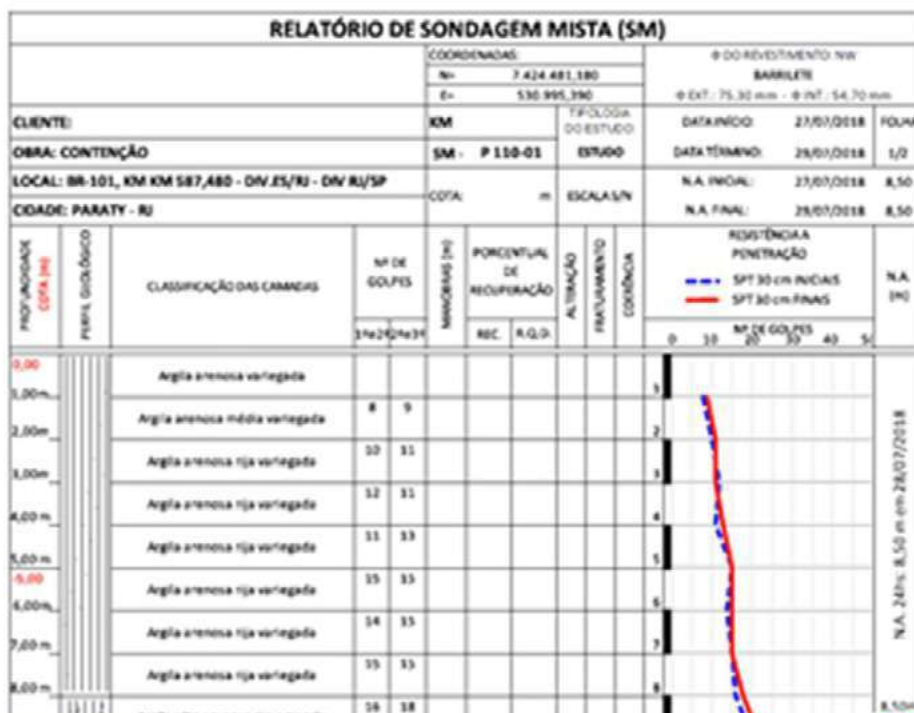
RODOVA: ESTRADA UNIÃO E INDÚSTRIA		CAMADA: Subleito	
TRECHO: PEDRO DO RIO - PETRÓPOLIS		MATERIAL:	
SURTIÇÃO:		OCORRÊNCIA: Segmentos com melhorias geométricas	
SEGMENTO: KM 0,0 - KM 24,7		DATA: out/2011	

RESUMO DE ESTUDOS									
ESTACA	366+6	368+7	368+7	569+4	570+5	571+5	572+5	573+5	574+5
REGISTRO	FURO 25	FURO 26	FURO 27	FURO 29	FURO 30	FURO 31	FURO 32	FURO 33	FURO 34
POSIÇÃO	LD	LE	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD
SONDAGEM Nº	RAMO 1								
Nº DE GOLPES	12	12	12	12	12	12	12	12	12
PROFUNDIDADE	0,70 a 1,40	0,50 a 1,40	0,80 a 1,30	0,70 a 1,00	0,70 a 0,90	0,70 a 1,20	0,70 a 1,10	0,70 a 1,30	0,60 a 1,10

GRANULOMETRIA										
PENEIRAS										
	2"									
	1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	89,90	100,00	100,00
	3/8"	99,7	100,0	100,0	97,2	96,2	93,20	87,4	98,7	89,40
	4"	98,9	99,9	100,0	95,7	95,2	90,7	86,0	98,5	87,1
	10	94,9	99,8	99,9	90,6	90,3	84,4	80,7	96,2	84,2
	40	83,6	98,1	95,9	87,1	84,1	52,7	47,4	72,2	84,9
	200	32,6	89,5	83,4	44,4	36,1	24,3	17,9	52,6	39,1
LIMITES FÍSICOS	LL	NL	81,2	76,1	NL	NL	NL	NL	47,6	35,7
	IP	NI	22,7	21,3	NI	NI	NI	NI	13,3	11,0
IG		0	17	16	0	1	0	0	4	2
HRB		A2-4	A7-5	A7-5	A 4	A 4	A2-4	A1b	A7-5	A 6

DNIT

PONTO 110



Fonte: Acervo técnico do DNIT

Apesar disso, observa-se que tais formulários ficam limitados ao espaço temporal daquela obra ou projeto. Quando se quer comparar, por exemplo, os estudos ou serviços a serem desenvolvidos em um empreendimento com outros realizados no mesmo local, em período anterior, pode-se contatar o antigo fiscal ou buscar as informações no acervo técnico da Sede ou da Superintendência Regional (SR).

O Sistema Eletrônico de Informações (SEI), utilizado já há alguns anos em toda a esfera governamental, ampliou a disponibilidade desses dados para consulta, desde que se conheça o número do processo administrativo ou dados do respectivo projeto.

2.1 CRIAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DA PLATAFORMA SUPRA

Para uma gestão mais eficaz no que se refere ao acompanhamento de obras, foi criado, em 2016, o Sistema de Supervisão Rodoviária Avançada (SUPRA), uma ferramenta que promove mais agilidade à atualização de informações, otimizando a gestão dos empreendimentos. A plataforma web permite a atualização de dados de empreendimentos entre as empresas supervisoras, as gerenciadoras, as SRs e a Sede do DNIT. O SUPRA é de uso obrigatório por parte das empresas supervisoras, uma vez que, sem o envio do relatório por meio do sistema, não há a geração do recibo de entrega e comprovação do trabalho realizado para justificar o pagamento pelo serviço.

2.1.1 INFORMAÇÕES DISPONIBILIZADAS PELO SUPRA

Embora haja benefícios proporcionados pelo sistema, do ponto de vista de organização de informações para a formação de um banco de dados, há ainda obstáculos a serem vencidos. No SUPRA, são disponibilizadas diversas informações sobre o contrato e sua execução ao

longo do tempo. As empresas contratadas devem alimentar o sistema mensalmente com dados atualizados sobre o avanço das obras, os quais são verificados pela fiscalização do DNIT e podem ser consultados pelos usuários conforme o mês de interesse.

Entre os documentos dos contratos, além de projetos e relatórios de ensaio, é possível realizar o download de uma planilha em Excel que contém um resumo das informações do projeto, disponibilizadas pela empresa supervisora da obra. Todas as informações são apresentadas na mesma aba da planilha e seu preenchimento ocorre de maneira similar a um relatório, de modo que os dados em diferentes células não estão vinculados e não possuem relação entre si. Detalha-se abaixo o padrão de informações da planilha:

- Informações de elaboração do projeto;
- Localização e características técnicas da rodovia;
- Estudos hidrológicos e supressão vegetal;
- Estudos e obras geotécnicas;
- Estrutura do novo pavimento e usina de asfalto;
- Características do asfalto – Resumo da dosagem; e
- Características do asfalto – Granulometria da mistura.

Como forma de exemplificação, a Figura 3 apresenta parte de uma planilha gerada pelo SUPRA, com informações sobre a dosagem e a granulometria da mistura asfáltica utilizada em determinado empreendimento.

A fiscalização do DNIT exige que sejam preenchidas as informações mínimas necessárias para a validação da dosagem da mistura, conforme a Norma DNIT 031/2006-ES, mesmo que algumas células permaneçam em branco (Figura 3). Para validação dos dados fornecidos

pela contratada, como a planilha não apresenta nenhum tipo de alerta de aceitação, a análise do fiscal pode ser dificultada, devido ao elevado número de informações constantes da planilha. Embora desempenhe papel fundamental para o acompanhamento de informações, a planilha do

SUPRA apresenta limitações, especialmente pela ausência de comunicação entre as planilhas mensais de um mesmo empreendimento ou mesmo de dois segmentos contíguos de obras que estejam sendo executados de forma simultânea.

Figura 3 – Informações do SUPRA sobre dosagem e granulometria da mistura asfáltica

CARACTERÍSTICAS DO ASFALTO - RESUMO DA DOSAGEM								
Tipo de Ligante Asfáltico		Ligante Asfáltico	Origem do Ligante Asfáltico	Camada de Revestimento	Densidade Máx. Mistura, Gmm			
Cimento asfáltico		CAP 50/70	MANAUS	5 cm	2480			
Massa Específica Aparente (Gmb, 2,392	Volume de Vazios, Vv (%)	Vazios do Agregado Mineral, VAM (%)	Relação Betume-Vazios, RBV (%)	Teor de Ligante (%)	Resistência à Tração, RT (Mpa)			
Estabilidade, (kgf) (75 golpes)	Tipo de Compactador	Método de Dosagem	Fluência, mm	Recuperação Elástica (%)	Material de Enchimento			
1,039	-	Marshall	-	-	-			
CARACTERÍSTICAS DO ASFALTO - GRANULOMETRIA DA MISTURA								
Material 1	%	Material 2	%	Material 3	%			
BRITA 1	32	BRITA 0	35	PÓ DE PEDRA	25			
Material 4	%	AREIA						
8								
Faixa Granulométrica do Concreto Asfáltico:								
Peneiras		% Passante						Curva Granulométrica
#	mm	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Faixa		
						Mínimo	Máximo	
1"	25,00							
3/4"	19,00	100	100	100	100	100	100	
1/2"	12,50	74,24	100	100	100	80	100	
3/8"	9,50	45,06	99,9	100	100	70	90	
nº4	4,75	13,47	50,55	99,85	99,59	44	72	
nº8	2,36							
nº10	2,00	6,68	14,75	77,26	95,87	22	50	
nº16	1,18							
nº30	0,60							
nº40	0,42	4,9	9,24	48,27	44,93	8	26	
nº50	0,30							
nº80	0,18	3,7	6,39	29,27	19,61	4	16	
nº100	0,15							
nº200	0,075	2	3,04	12,71	4,58	2	10	

Fonte: Acervo técnico do DNIT/SUPRA

2.2 DEMANDAS DE ÓRGÃOS DE CONTROLE

Um outro ponto a se considerar para elaboração de formulários padrão está ligado às inúmeras demandas encaminhadas por Órgãos de Controle e, também, pela Auditoria Interna. Essas solicitações envolvem a Coordenação-Geral do Instituto de Pesquisas em Transportes (IPR) ou o DNIT, seja na Sede ou nas Superintendências Regionais, e, para seu adequado atendimento, usualmente se faz necessária a verificação de dados relativos a diversos empreendimentos sob responsabilidade da autarquia. Um número significativo de

demandas envolve análises de parâmetros exigidos pelo DNIT ou a criação de documentos normativos. Essa busca de informações exige significativo esforço e tempo, especialmente pela falta de padronização de formulários e inexistência de um banco de dados organizado para consulta.

De forma exemplificativa, citam-se duas pesquisas recentes realizadas por técnicos do IPR na tentativa de responder demandas dessa natureza. A primeira decorreu de uma recomendação do Tribunal de Contas da União (TCU), de elaboração de uma especificação de

serviço de camada granular para fundação de aterros sobre solos moles. Foi, então, necessário buscar valores do Equivalente de Areia (EA), que é um parâmetro obtido a partir do ensaio descrito na Norma DNER-ME 054/97.

A busca em projetos e obras demandou tempo elevado, até que pudesse ser reunida uma base de dados com consistência estatística suficiente para definição do valor do parâmetro a ser adotado na nova especificação de serviço. Visando padronizar o levantamento de dados, foi definido no IPR o mínimo de 4 projetos/obras por estado que contivessem, nos estudos geotécnicos, dados de EA e granulometria, para avaliação de uma possível correlação.

A pesquisa foi realizada inicialmente no Atlas

Gerencial da DPP, com 455 processos, e nas Portarias de Aprovação de Projetos, publicadas em Boletins Administrativos do DNIT, com 1028 processos, totalizando 1483 processos não repetidos. Apesar do considerável volume de processos consultados, não foi possível atingir a quantidade de dados geotécnicos mínima estabelecida por estado. Para complementação dos dados, solicitou-se às SRs de todo o país que enviassem o restante das informações necessárias, o que demandou mais tempo dispendido em reuniões e discussões. De posse dos dados, foi possível estabelecer um valor mínimo para o EA e elaborar a Norma DNIT 441/2023 – ES, que se encontra publicada no site do IPR (Figura 4).

Figura 4 – Norma gerada após recomendação do TCU

 MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES DIRETORIA-GERAL DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES Setor de Aterros e Mole Quadra 03 Lote A Ed. Núcleo dos Transportes Brasília – DF – CEP 70040-902 Tel./fax: (61) 3315-4831	FEVEREIRO 2023	NORMA DNIT 441/2023 – ES
	Camada granular para fundação de aterros sobre solos moles – Especificação de serviço	
Resumo Este documento estabelece a sistemática a ser empregada na substituição total ou parcial de solos moles por uma camada granular na fundação de aterros rodoviários. São também apresentados os requisitos	Autor: Instituto de Pesquisas em Transportes – IPR Processo: 50600.015722/2021-19 Aprovação pela Diretoria Colegiada do DNIT na reunião de 17/02/2023. <i>Direitos autorais exclusivos do DNIT, sendo permitida reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte (DNIT), mantido o texto original e não acrescentado nenhum tipo de propaganda comercial.</i>	
	Palavras-chave: Camada granular, substituição solo mole, aterro rodoviário	Nº total de páginas 11
	7 Condicionantes ambientais 5 Anexo A (Normativo) – Amostragem variável 8 Anexo B (Informativo) – Visualização esquemática da camada granular 9 Anexo C (Informativo) – Bibliografia 10	

Fonte: DNIT 441-ES, 2023

A outra pesquisa trata da busca relacionada ao parâmetro volumétrico conhecido como Fator de Homogeneização (FH). Para tanto, foram consultados os mesmos processos levantados na pesquisa sobre o EA, mantendo a premissa quanto ao número mínimo de dados necessários para a avaliação. Considerando, porém, a influência de diversos fatores que podem afetar o valor do FH, concluiu-se que não é possível estabelecer um valor desse parâmetro de forma

nacional ou mesmo regional, como recomendado inicialmente pelo TCU. Por fim, o próprio Órgão de Controle considerou cumprida a recomendação e determinou o arquivamento dos autos.

2.3 VANTAGENS DA PADRONIZAÇÃO DE FORMULÁRIOS

Por seguirem o *layout* próprio de empresas contratadas, algumas vezes, os resultados de estudos e ensaios são apresentados de forma

desordenada e/ou incompletos, o que dificulta a análise por parte dos técnicos da autarquia. A adoção de um formulário padronizado para a entrega desses dados permitirá melhor visualização, devido à sua organização, uniformidade e posicionamento padrão das informações de interesse. Assim, o processo de avaliação dos resultados fornecidos pelas contratadas em relação aos critérios exigidos pelas normas da autarquia poderá ser realizado com maior fluidez e celeridade.

Além disso, o uso de formulários padronizados irá possibilitar a criação de um banco de dados nacional, categorizando os materiais empregados nas obras rodoviárias executadas em diferentes regiões do Brasil. Posteriormente, a disponibilização dessas informações permitirá prever valores de parâmetros de materiais existentes em regiões com novos empreendimentos no DNIT.

3 PESQUISA DE MODELOS DE FORMULÁRIOS EXISTENTES

Na elaboração do presente trabalho, verificou-se a existência de modelos de formulários padrão em Órgãos Rodoviários dentro e fora do país, especialmente no que se refere aos serviços de pavimentação, para compreender como as informações geradas são disponibilizadas. Buscou-se agregar à proposta de formulários para o DNIT todas as informações necessárias à caracterização e detalhamento dos insumos e parâmetros das camadas de pavimentos.

Além disso, foi verificado também os dados já disponíveis na plataforma SUPRA, sistema do DNIT já descrito no item 2.2. Avalia-se que, embora haja a disponibilização mensal de importantes informações sobre os insumos,

ensaios e camadas, estas ficam restritas a cada contrato específico, não havendo compartilhamento de dados com outros empreendimentos da Autarquia, o que impossibilita a realização de comparações ou análises adicionais. Além disso, verifica-se a necessidade de um detalhamento mais amplo nas informações exigidas nos formulários, de modo a facilitar a visualização pela fiscalização do DNIT.

3.1 MODELOS INTERNACIONAIS

Alguns Departamentos de Transportes nos Estados Unidos disponibilizam formulários para a coleta de resultados de ensaios de forma padronizada. O principal exemplo é o da *Federal Highway Administration* (FHWA), ligada ao *U.S. Department of Transportation*, que oferece relatórios automatizados em PDF, no seu website, para diferentes tipos de ensaios, abrangendo a caracterização de solos e agregados, além de diferentes tipos de dosagem de misturas asfálticas.

Como exemplo, o formulário para a dosagem de misturas asfálticas pelo método Marshall permite inserir as informações quanto aos agregados utilizados, tipo e características do ligante e todos os outros dados pertinentes aos ensaios realizados. Também podem ser selecionados as peneiras adotadas, faixas granulométricas e métodos de ensaio. Por fim, o formulário fornece os resultados finais segundo as formulações das normas aplicáveis, além dos gráficos associados. É possível, inclusive, escolher o sistema de unidades a ser considerado, além de dados do projeto, da contratante e do laboratório responsável pelo ensaio. A Figura 5 apresenta o formato geral do formulário da FHWA.

Figura 5 – Fragmento de formulário padrão disponibilizado pela FHWA

U.S. Department of Transportation
Federal Highway Administration
Federal Lands Highway

**WORKSHEET FOR A MARSHALL MIX DESIGN
AASHTO T 245**

Project: _____ Date: _____
 Contractor: _____ Class & Grading of mixture: _____
 Asphalt supplier: _____ Grade of asphalt: _____
 Sources for: Aggregates: _____ Mineral filler: _____
 Testing laboratory name: _____ Phone: _____
 Testing performed by: _____
 Testing reported by: _____

WORKSHEET FOR A MARSHALL MIX DESIGN (Continued)

Trial Number	1	2	3
% Asphalt by mass of total mix, (P_t)			
Effective Binder Content (P_{be})			
Specimen height,			
Marshall Stability,			
Marshall Flow,			
Bulk specific gravity, (G_{sb})			
Bulk unit mass,			
Max. specific gravity, (G_{mm})			
Dust-to-Binder ratio, (DP)			
% Air voids, (V_a)			
% Voids in mineral aggregate, (VMA)			
Average Marshall Stability value,			
Average Marshall Flow value,			
Average % Air voids, (V_a)			
Average % Voids in mineral aggregate, (VMA)			

Fonte: Federal Highway Administration (FHWA, 2023)

Entre os departamentos estaduais de impressão e preenchimento manual, sem muitas transportes norte-americanos (DOTs), que disponibilizam formulários, pode-se citar o de trazer um guia com instruções de utilização da Alabama (Figura 6a) e o do Texas (Figura 6b). O primeiro é apenas um relatório convencional, para automatização para obtenção de parâmetros.

Figura 6 – Formulários disponibilizados pelos DOT's norte americanos (*Alabama Department of Transportation e Texas Department of Transportation*)

a) Formulário do DOT do Alabama

ALABAMA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION
BMT-20-M
Revision 2/26/03
ASPHALT PLANT MIXTURE TEST REPORT (Marshall)

Copies: _____ Project Number: _____
 HMA Lab _____ County: _____
 Division _____ Division: _____
 Project Engineer _____ Lab. Number: _____
 File _____ Contractor Testing _____
 Department Testing _____

Pay Item No. _____ Mix No. _____ Lot No. _____ Date(s) Sampled: _____
 Producer: _____ Date(s) Tested: _____
 Tons Produced: (This Report) _____ JMF Number: _____
 Prime Contractor: _____ Paving Contractor: _____

Analysis:

Sample Number	1	2	3	4	5	6
Production Ton Sampled						
Loading Temp.						
Truck Number						
Sieve						
37.5 mm (1 1/2")						
75.0 mm (3")						
19.0 mm (3/4")						

b) Seção de uma planilha disponibilizada pelo DOT do Texas

Target Density, %	
Number of Gyration:	
Asphalt Spec. Grav.	
RAP (% of Total Mix):	
AC% of RAP:	
RAS (% of Total Mix):	
AC % of RAS:	

TEST SPECIMENS							
Asphalt Content (%)	Binder Ratio (%)	Specific Gravity Of Specimen (G _s)	Maximum Specific Gravity (G _m)	Effective Gravity (G _e)	Theo. Max. Specific Gravity (G _m)	Density from Gt (Percent)	VMA (Percent)

Fonte: Alabama Department of Transportation (2023) e Texas Department of Transportation (2023)

3.2 MODELOS DE ÓRGÃOS ESTADUAIS NO BRASIL

Dois modelos de formulários utilizados por órgãos rodoviários estaduais do Brasil foram verificados, os quais são detalhados a seguir. Ressalta-se que não há interesse na discussão das variáveis apresentadas ou dos métodos aplicados pelos órgãos, sendo o objetivo apenas aprimorar o desenvolvimento dos formulários do DNIT.

3.2.1 GOINFRA/GO - FORMULÁRIO PADRÃO

A Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes (Goinfra) utiliza formulários padrão que auxiliam na entrega e avaliação dos serviços contratados e cumprimento de sua legislação. Por meio da Circular nº 1/2021 - DOR- 06105, foram determinadas as recomendações a serem seguidas, detalhando dois itens obrigatórios na entrega dos produtos pelas contratadas. Para os arquivos, o cabeçalho informa que devem ser preenchidas apenas as abas correspondentes ao serviço prestado e as demais devem ser excluídas. Entretanto, nenhuma outra aba deve ser inserida, como forma de manter a padronização. Os arquivos são dimensionados para que sejam impressos ao final do processo.

- **Memorial de Cálculo**

O memorial de cálculo é um documento técnico que demonstra os cálculos dos quantitativos referentes aos serviços executados no período da medição e que devem constar do

orçamento da obra. Este formulário conta com uma capa, em que são descritas todas as informações de identificação da obra, incluindo o número do contrato, do processo de medição e do processo técnico, além das informações da empresa contratada.

O material de memorial de cálculo da Goinfra reúne todos os serviços utilizados na medição, com código, descrição e relação contratada. Além dessas informações, em cada aba é discriminado um processo executivo, contendo todas as variáveis necessárias para realização dos cálculos conforme as normas. Como o formulário é apresentado em formato Excel, as células são automatizadas e os resultados apresentados conforme a inserção das variáveis.

- **Resumo dos Resultados de Ensaios Laboratoriais**

Por incluir a caracterização de todos os serviços apresentados no memorial de cálculo, o arquivo conta com diversas abas e, para tal organização, é apresentado um sumário que reúne todas as atividades desenvolvidas. Uma das principais vantagens dos formulários da Goinfra/GO se dá pela validação das informações relacionadas com as normas utilizadas pela Agência. Automaticamente, ao passo que são preenchidas as informações, o formulário apresenta a mensagem de “Aprovado (em verde)” ou “Reprovado (em vermelho)”, conforme exemplo da Figura 7.

Figura 7 – Formulário da Goinfra

GO INFRAS										
ESTADO DE GOIÁS										
AGÊNCIA GOIANA DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES										
RECEBIMENTO DE CAP MODIFICADO POR POLÍMERO ELASTOMÉRICO (AMP)										
RODOVIA:	PERÍODO MEDIÇÃO:						MATERIAL:	CAP 65 / 90 - POLÍMERO ELASTOMÉRICO		
TRECHO:										
EMPRESA DE EXECUÇÃO:										
EMPRESA DE SUPERVISÃO:										
Data	Nº Nota Fiscal	Quantidade e AMP (ton.)	Penetração a 25 °C AMP (DNIT 155/2011-ME)	Ponto de fulgor. (DNER-ME 148/94)	Viscosidade "Brookfield" a 135 °C spindle 21, 20 rpm	Viscosidade "Brookfield" a 150 °C spindle 21, 50 rpm	Viscosidade "Brookfield" a 177 °C spindle 21, 100 rpm	Recuperação elástica Ductômetro a 25 °C, 20cm, min. (DNIT 130/2010-ME)	Ponto de amolecimento (ABNT NBR-6560)	Validação
12/08/2022	125846	2,0	58	228	1125	525	187	83	52	APROVADO
18/09/2022	546289	1,8	62	231	1164	512	192	76	49	APROVADO
25/11/2022	548726	2,3	56	296	1205	545	185	81	51	APROVADO

Fonte: Circular nº 1/2021, Goinfra - DOR-06105 (2023)

3.2.2 SIE/SC - FORMULÁRIO PADRÃO

A Secretaria de Infraestrutura e Mobilidade (SIE) de Santa Catarina possui Instruções de Serviço para a realização de suas obras e atividades. Só são utilizadas normas externas caso a Secretaria não tenha regulamentação própria.

A SIE disponibiliza às contratadas formulários padrão que possibilitam o monitoramento e acompanhamento da obra, que incluem: Cronograma financeiro global e físico; Volumes

de Terraplanagem; Controle de Escavação etc. Além dessas etapas, no mesmo arquivo, são apresentadas abas exclusivas ao controle tecnológico dos insumos e camadas. O fato de todas essas etapas estarem presentes no mesmo arquivo facilita o controle dos procedimentos, tanto da fiscalização, quanto pela contratada. Seguindo com o foco em misturas asfálticas, a Figura 8 apresenta o modelo de formulário disponibilizado pela SIE.

Figura 8 – Modelo de formulário disponibilizado pela SIE

8. CONTROLES TECNOLÓGICOS

8.1 CONTROLE DE EXECUÇÃO DE ENSAIOS TECNOLÓGICOS PARA ACOMPANHAMENTO DE OBRAS RODOVIÁRIAS

TIPO DE SERVIÇO / ENSAIO	ITEM DA ESPECIFICAÇÃO	FREQUÊNCIA MÍNIMA	Nº DE ENSAIOS		
			CONSULTORA	CONSTRUTORA	TOTAL DE CONTROLE
Concreto Asfáltico Usinado Quente					
Granulometria dos agregados	5.1.1.2.c	semanal			
Granulometria do filler	5.1.2.1.d	p/carga			
Concentração crítica do sistema filler betume (CCF)		semanal			
Relação finos betume		100t ou 1/dia			
Capacidade de suporte marshall (CSM)		100t ou 1/dia			
Temperatura do silos quente	5.1.2.1.	8/dia			
Temp. CAP entrada misturador	5.1.2.1	8/dia			
Temp. da mistura nos caminhões	5.1.2.1	8/dia			
Temp. início da compactação					
Teor de CAP	5.1.2.2.a	100t ou 1/dia			
Granulometria da mistura	5.1.2.2.b	100t ou 1/dia			
Grau de Compactação	5.1.2.2.c	100t			
Resistência à tração por comp. Diametral (RTCD)		semanal			
Espessura	5.2.1.a				
Largura	5.2.2				

Fonte: SIE (2023)

Diferentemente da Goinfra, a SIE não apresenta em seu formulário a possibilidade de validação imediata das informações inseridas. O uso dos formulários padrão não é exigência da Secretaria, mas, mesmo assim, de certa forma, já ocorre uma padronização das informações recebidas.

4 IMPLEMENTAÇÃO DE FORMULÁRIOS PADRÃO E A CRIAÇÃO DO BANCO DE DADOS

Considerando a proposta apresentada no presente artigo, foram elaborados modelos de formulários padrão, relacionados, inicialmente, aos serviços de pavimentação, contendo todos os parâmetros inerentes ao serviço contratado, de

acordo com suas respectivas normas.

Entre os modelos elaborados, estão os serviços de: base estabilizada, tratamentos superficiais, microrrevestimento, concreto asfáltico e outros. Neste artigo apresenta-se a proposta de formulários para o serviço de Concreto Asfáltico, conforme a Norma DNIT 031/2006-ES, Pavimentos Flexíveis. Para a elaboração desses formulários, foram consideradas todas as exigências na especificação vigente, bem como os limites determinados para a validação dos serviços. Dessa forma, a caracterização de todos os insumos utilizados (ligante asfáltico, agregados e material de enchimento), assim como os parâmetros de dosagem, estão contemplados. Utilizou-se a ferramenta Excel para criação de um arquivo com divisão das abas conforme o insumo

é adicionado à mistura e sua caracterização. Posteriormente, a mistura foi composta trazendo as informações individuais dos materiais, referenciadas nas abas anteriores. Por fim, os valores absolutos da mistura são direcionados a dois formulários resumidos, um de posse da empresa e outro do DNIT. A seguir, as abas são descritas de forma detalhada.

• Identificação

Na parte superior de todas as abas, é apresentado um cabeçalho geral, com a identificação da obra, do trecho e o serviço abordado no formulário, conforme a Figura 9. Esse tipo de identificação pode ser alterado com o aprimoramento do formulário, mas tem por objetivo que todas as informações necessárias do trecho sejam adicionadas.

Figura 9 – Cabeçalho do formulário

				CONCRETO ASFÁLTICO						
Registro de Ensaio				NOME DA EMPRESA QUE REALIZOU O ENSAIO CNPJ DA EMPRESA QUE REALIZOU O ENSAIO						
INFORMAÇÕES GERAIS										
Processo SEI	Contrato	Lote	Estado (Sigla)	BR	Trecho	Segmento	Rodovia	Ferrovia	OAE	
							☒	☐	☐	
SNV		Estaca Inicial		Estaca Final		Assunto Geral				
Data do doc:	Ocorrência:	Corte	Empréstimo	Jazida	Camada de aplicação	Subleito	Reforço Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
		☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	☒
Amostra n°	Responsável(is):									

Fonte: Elaboração própria

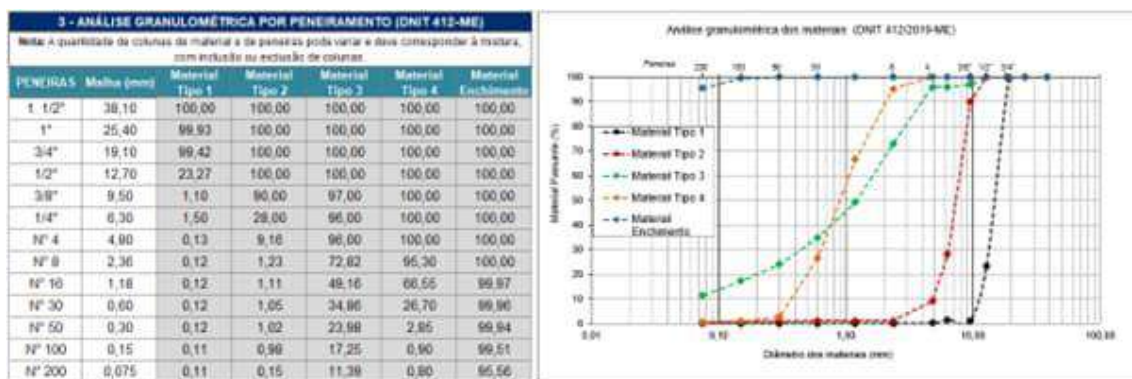
• Caracterização dos materiais

Os materiais que compõem o concreto asfáltico (agregados e ligante asfáltico) são caracterizados conforme as normas atuais do DNIT. Quanto aos agregados, conforme as frações granulométricas que compõem a mistura são adicionadas, obtém-se automaticamente a curva granulométrica (Figura 10). Caso sejam utilizadas normas divergentes daquelas já apresentadas, essas devem ser justificadas e

incluídas com igual nível de detalhamento no formulário.

Para o preenchimento dos materiais, o formulário apresenta uma ordem numerada, que deve ser seguida e corresponde ao recomendado pela DNIT 031/2006-ES. A partir da inserção das variáveis, o resultado final é calculado de forma automática, uma vez em que as fórmulas já estão inseridas no arquivo e não serão passíveis de alteração.

Figura 10 – Análise Granulométrica



Fonte: Elaboração própria

O objetivo da planilha é de que o processo seja o mais automatizado possível, e, dessa forma, somente os espaços em cinza devem ser preenchidos. Essa é apenas uma recomendação, ou seja, o usuário pode alterar as peneiras utilizadas, por exemplo. Entretanto, deve-se ter cautela com as informações inseridas, pois a distribuição granulométrica está atrelada à abertura da peneira informada.

• Dosagem do concreto asfáltico

A partir da caracterização dos agregados e ligante asfáltico utilizados, a mistura é produzida, incluindo a faixa granulométrica de trabalho utilizada. Uma das expectativas do formulário padrão é de que o usuário selecione a faixa de interesse para composição da mistura e os limites de cada peneira sejam apresentados de forma automática e fixa. O usuário poderá apenas

informar a composição da curva e esta será relacionada aos padrões disponibilizados pelo DNIT. Caso a curva não atenda qualquer das informações, o fiscal será informado e poderá intervir de maneira assertiva e pontual.

Posteriormente à formulação da mistura, os parâmetros de dosagem são verificados em outra aba. Neste momento, além da referência das normas utilizadas, o formulário também indica a quantidade de amostras necessárias para a determinação do parâmetro. Por exemplo, caso sejam obtidos pela média de três amostras, a célula final realizará esse cálculo a partir das variáveis inseridas, identificadas pela célula na cor cinza. A Figura 11 apresenta um modelo para determinação da densidade máxima medida (Gmm) e da densidade aparente (Gmb) da mistura.

Figura 11 – Exemplo de determinação das densidades da mistura

2 - CARACTERÍSTICAS DA MISTURA				
Observação: Caso sejam utilizados ensaios diferentes dos especificados na DNIT 031-ES, estes devem ser justificados de maneira técnica e detalhada com suas variáveis e unidades. Todas as normativas utilizadas devem estar atualizadas e discriminadas.				
Variáveis		Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
2.1- DNIT 427-ME:				
A = Massa seca em estufa (g):		588,90	598,91	585,92
B = Massa do recipiente vol. completo com água (g):		1592,70	1592,00	1582,70
C = Massa do recipiente com a amostra submersa (g):		1942,90	1942,90	1942,90
Resultado Densidade Máxima Medida (Gmm):		2,47	2,41	2,60
Resultado Massa Específica Máxima Medida (Memm) (g/cm³):		2,46	2,41	2,59
Amostras não compactadas				
2.2- DNIT 428-ME:				
Altura do corpo de prova (cm):		6,1		
Diâmetro do corpo de prova (cm):		10,14		
A = Massa seca em estufa (g):		1247,44	1247,00	1240,04
B = Massa do corpo de prova submerso na água (g):		732,22	732,12	731,22
C = Massa do corpo de prova saturado com a superfície seca (g):		1259,01	1263,01	1258,11
Água absorvida pelo corpo de prova (%):		2,20	3,02	3,43
Resultado Densidade aparente (Gmb):		2,37	2,36	2,35
Resultado Massa Específica aparente (Mea) (g/cm³):		2,36	2,34	2,35
Volume de vazios dos corpos de prova (Vv) (%):		4,02	2,73	9,33
Corpos de prova compactados				

Fonte: Elaboração própria

Todas as variáveis necessárias para os cálculos são apresentadas, bem como a ordem necessária para que o cálculo seja realizado. As normas utilizadas também são discriminadas e, caso necessário, são informados também os lembretes disponibilizados pela norma. De posse de todas essas informações, a caracterização do concreto asfáltico será realizada de forma completa e essas informações poderão posteriormente compor o banco de dados do DNIT.

- **Resumo de validação**

Por fim, após a inserção de todas essas informações, uma planilha resumo será gerada

contendo os dados disponibilizados nas demais abas, não sendo passível de alterações. Ou seja, caso alguma informação não tenha sido preenchida anteriormente, a respectiva célula permanecerá em branco. A planilha do serviço deverá ser enviada pela empresa à fiscalização, que, por sua vez, será capaz de transferir as informações e, de forma automatizada, verificar o atendimento às normas correspondentes. Para a validação, o objetivo é de que a planilha seja interativa e objetiva, ou seja, um alerta de “aprovado”, “reprovado” ou “sem valor mínimo” é atribuído ao parâmetro, identificado por cores de alerta (Figura 12).

Figura 12 – Planilha resumo para validação da mistura

DOSAGEM DA MISTURA			
Metodologia / Norma:		MARSHALL	
Tipo de compactador usado:		Compactador Automático	
Dosada em laboratório/ Extraída de pista:		Dosada em laboratório	
Número de Golpes / Giros:		75 Golpes por face	
Energia de compactação:		-	
Condicionamento prévio à compactação:		2 horas	
Temperatura dos agregados (°C):		155° C	
Temperatura compactação (°C):		145° C	
Teor de ligante de projeto(%):		5,00%	
Norma	Variáveis	Resultado	Validação Normas DNIT
2.1- DNIT 427-ME:	Resultado Densidade Máxima Medida (Gmm):	2,49	Sem valor mínimo
	Resultado Massa Específica Máxima Medida (Memm) (g/cm³):	2,49	Sem valor mínimo
2.2- DNIT 428-ME:	Resultado Densidade aparente (Gmb):	2,36	Sem valor mínimo
	Resultado Massa Específica aparente (Mea) (g/cm³):	2,35	Sem valor mínimo
	Volume de vazios dos corpos de prova (Vv) (%):	4,36	Aprovado
2.3- DNIT 031-ES:	Teor de ligante de projeto (Pb):	4,90	Sem valor mínimo
	Porcentagem total de agregados na mistura asfáltica (Ps):	95,10	Sem valor mínimo
	Densidade relativa do ligante asfáltico (Gb):	1,03	Sem valor mínimo
	Densidade relativa real dos agregados (Gsa):	2,93	Sem valor mínimo
	Densidade relativa aparente dos agregados (Gsb):	2,74	Sem valor mínimo
	Densidade relativa efetiva dos agregados na mistura (Gse):	2,66	Sem valor mínimo
	Porcentagem de ligante asfáltico absonido (Pba):	0,85	Aprovado
	Porcentagem de ligante efetivo (Pbe):	4,05	Aprovado
	Proporção fíler / asfalto (F/A):	0,39	Aprovado
	Vazios do Agregado Mineral (VAM):	17,80	Aprovado
	Relação Betume Vazios (RBV):	77,43	Reprovado

Fonte: Elaboração própria

Assim, visualmente, também é possível verificar a conformidade ou não das informações disponibilizadas pela contratada e realizar as análises necessárias.

O uso contínuo dessas planilhas padrão proporcionará a criação de um banco de dados compatibilizado e que funcione de forma automatizada. Assim, o acesso às informações poderá ser realizado de maneira expedita e, a

médio prazo, a previsão de comportamento de materiais poderá ser estimada instantaneamente.

4.1 CRIAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS

Como já abordado, a plataforma SUPRA promoveu uma melhor gestão dos empreendimentos do DNIT. No entanto, a extração desses dados para formação de um banco geral não é simples, pois, apesar de

estarem armazenados em servidor próprio, não há uma forma de acesso ágil à informação desejada ou algum filtro que permita restringir o universo de dados. Desse modo, é necessário acessar os relatórios individualmente e buscar o boletim de ensaio desejado.

A implementação dos formulários padrão viabiliza a criação de um banco de dados para a autarquia, pois a concentração e organização dessas informações facilitará a categorização dos parâmetros obtidos nos diferentes tipos de ensaio. Assim, essa nova ferramenta disponibilizará para a autarquia dados de significativa importância para análise, correlação e avaliação nacional e regional de diversos parâmetros utilizados nos empreendimentos, promovendo, inclusive, uma possível redução nos custos de projetos, pelo conhecimento do comportamento de materiais disponíveis em jazidas. Já existem alguns trabalhos que abordam o tema da coleta de informações para a criação de banco de dados, principalmente associados a dados geológicos-geotécnicos. Soares (2011) aborda a criação de mapas georreferenciados com informações de Nspt, para diferentes profundidades, no município de João Pessoa - PB, tendo por base boletins de sondagem à percussão.

Ribeiro et al. (2016) também descrevem a criação de um banco de dados geotécnicos georreferenciados, a partir de informações de projetos rodoviários, enquanto Barbosa (2018) apresenta proposta para criação de dados geotécnicos de argilas moles no município de Recife - PE. Fonseca et al. (2020) organizaram um banco de dados para misturas asfálticas de pesquisas realizadas no estado do Ceará, a fim de atender aos parâmetros de entrada em métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos. Alguns trabalhos internacionais

também abordam a criação de bancos de dados em diferentes localidades, com resultados de ensaios em vários materiais (Todo et al., 2013; Yousefdoost et al., 2018; Cheriet et al., 2023).

Apesar de servirem como bons exemplos de sistema de coleta e categorização de dados, esses trabalhos ainda estão limitados a apenas alguns parâmetros e dentro de localização geográfica limitada quando comparado ao território brasileiro.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve por objetivo apresentar uma proposta de elaboração de formulários padrão para uso no DNIT. Entende-se que a implementação de tal ação é relativamente simples e pode promover ganhos significativos em termos de acompanhamento, avaliação de obras e materiais. Verifica-se que alguns órgãos rodoviários, dentro e fora do país, já utilizam formulários padronizados, sendo alguns com uma melhor automatização. Essa proposta deve necessariamente passar pela avaliação das Diretorias do Órgão, especialmente a Diretoria de Planejamento e Pesquisa (DPP) e a Diretoria de Infraestrutura Rodoviária (DIR).

Espera-se que esse seja um passo inicial para a criação de um banco de dados de empreendimentos do DNIT, por meio de ferramenta informatizada, que auxiliará, inclusive, nos ajustes na calibração do novo Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa. A captação das informações oriundas de projetos e obras da autarquia, auxiliada pela implementação dos formulários padrão, permitirá o acúmulo de volume significativo de dados de forma célere. Quando implementado, esse sistema poderá se tornar uma poderosa ferramenta de consulta no âmbito do DNIT, auxiliando os servidores em diferentes tipos de análises e tomada de decisões.

REFERÊNCIAS

ALABAMA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Testing Manual - BMT Forms and Worksheets**. Disponível em: <https://www.dot.state.al.us/publications/Materials/TestingManual/BMTIndex>. Acesso em: 5 maio 2023.

BARBOSA, H. T. **Banco de dados geotécnicos das argilas moles da região metropolitana do Recife (RMRecife)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

BRASIL. **Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001**. Dispõe sobre a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre, cria o Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte, a Agência Nacional de Transportes Terrestres, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, e dá outras providências. Brasília, DF.

BRASIL. **Resolução nº 39, de 17 de novembro de 2009**. Aprova o novo Regimento Interno do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT e revoga Resolução/CONSAD/DNIT nº. 26, de 05 de maio de 2016.

CHERIET, F.; ZERGUINE, A.; CHERIET, A.R. Development of a Geotechnical Database using the Geographic Information System Approach. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, p. 10239-10242, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER. **ME 054/97: Equivalente de areia**. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **031-ES: Pavimentação asfáltica – Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. FHWA. **Technical Resources – Materials Testing Forms**. Disponível em: <https://highways.dot.gov/federallands/materials/forms>. Acesso em: 5 maio 2023.

FONSECA, B. F.; BASTOS, J. B. S.; LUCAS JÚNIOR, J. L. O.; SOARES, J. B. Banco de dados de misturas asfálticas avaliadas no Ceará. **Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET 34**, p. 1422-1433, 2020.

AGÊNCIA GOIANA DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. Goinfra. **Circular nº 1/2021 - DOR-06105, de 26 de abril de 2021**. Diretoria de Obras Rodoviárias. 2023.

RIBEIRO, A.J.A.; SILVA, C.A.U.; BARROSO, S.H.A. Metodologia para criação de um banco de dados georreferenciado a partir de dados geotécnicos obtidos em “as built” e projetos rodoviários. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Universidade Federal de Goiás, v. 12, n. 2, p. 1-13, 4 jul. 2016.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MOBILIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA. SIE. **Documentos Técnicos**. Disponível em: <https://www.sie.sc.gov.br/doctecnicos>. Acesso em: 1 jun. 2023.

SOARES, W.C. **Banco de Dados Geológico - Geotécnicos com Base em Sondagens à Percussão e Uso de SIG**: Análise Espacial da Profundidade do Lençol Freático e do NSPT para Obras de Fundação em João Pessoa – PB, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Project Development Resources – Materials Forms**. Disponível em: <https://www.txdot.gov/business/resources/materials/materials-forms>. Acesso em: 5 maio 2023.

TODO, H.; YAMAMOTO, K.; MIMURA, M.; YASUDA, S. Japan's Nation-Wide Eletronic Geotechnical Database Systems by Japanese Geotechnical Society. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 31, p. 941-963, 2013.

YOUSEFDOOST, S.; DENNEMAN, E.; BEECROFT, A.; VUONG, B. Development of a national database of asphalt material performance properties in support of perpetual pavement design implementation in Australia. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 68-87, 2018.

EFEITO DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS NA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO A PARTIR DE ANÁLISES MECANÍSTICAS

EFFECT OF INTERLAYER ADHERENCE CONDITIONS ON PAVEMENT SERVICE LIFE ESTIMATION THROUGH MECHANISTIC ANALYSES

Raul Tadeu Lobato Ferreira - raul.ferreira@ufmt.br - <https://orcid.org/0000-0003-3789-8160>

Márcio Muniz de Farias - muniz@unb.br - <https://orcid.org/0000-0002-5257-911X>

Lucas Fermi Pereira de Oliveira - lucas.fermi@outlook.com - <https://orcid.org/0009-0003-3638-2194>

Hermes Wiliam Bressanin - hermes.bressanin@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0000-0002-0037-3574>

Luiz Guilherme Rodrigues de Mello - luiz.mello@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0000-0002-1507-0154>

RESUMO: O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa) é composto por três diferentes programas computacionais para dimensionamento de pavimentos asfálticos, com a análise de tensões, deformações e deslocamentos realizada pelo programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC). Para a análise estrutural, a rotina AEMC leva em conta a condição de aderência entre as camadas, que no MeDiNa é definida em função da posição e da tipologia das camadas (granular, estabilizada ou asfáltica). O presente estudo apresenta uma análise comparativa entre o AEMC e outras ferramentas de análise de tensões e deformações em sistemas de camadas elásticas, variando as condições de aderência entre camadas. Os valores de tensão, deformação e deslocamento obtidos no AEMC para a estrutura de pavimento proposta, para uma mesma condição de aderência, apresentam pouca diferença em relação aos valores obtidos recorrendo a outras ferramentas de análise. De modo geral, as deflexões, tensões e deformações obtidas para camadas não aderidas são mais conservadoras. Nesse sentido, as condições de aderência entre camadas pré-estabelecidas na versão atual do MeDiNa, disponível para *download*, priorizam a integridade estrutural em detrimento da economia.

PALAVRAS-CHAVE: análise estrutural; MeDiNa; interface; vida útil; pavimento flexível.

ABSTRACT: *The National Pavement Design Method (MeDiNa) comprises three software for designing asphalt pavements, with stresses, strains, and displacements analysis performed by Multilayer Elastic Analysis (AEMC). For structural analysis, the AEMC routine takes into account the adherence condition between layers boundaries, which in MeDiNa is defined according to the layer position and typology (granular, stabilized, or asphaltic). The present study provides a comparative analysis between AEMC and other stress and strain analysis tools in elastic layer systems, varying the interlayer adherence conditions. The stress, strains, and displacement values obtained by AEMC for the proposed pavement structure, under the same adherence condition, show little difference compared to values obtained using other analysis tools. In general, the displacements, stresses, and strains obtained for unbonded conditions are more conservative. Concerning adherence conditions between layers pre-established in*

the current version of MeDiNa, available for download, structural integrity prevails to the detriment of the economy.

KEYWORDS: *structural analysis; MeDiNa; interface adherence; service life; flexible pavement.*

1. INTRODUÇÃO

Devido a sua simplicidade, a teoria da elasticidade é uma ferramenta frequentemente utilizada na análise e no dimensionamento de pavimentos (Loulizi; Al-Qadi e Elseifi, 2006). Essas estruturas consistem em sistemas estratificados que não podem ser representados por uma massa homogênea, principalmente pela diferença de rigidez dos materiais que a constituem (Huang, 2004; Medina e Motta, 2015). Buscando um modelo matemático que melhor representasse esses sistemas, Burmister (1943) desenvolveu a teoria do sistema de duas camadas e posteriormente essa solução foi ampliada para um sistema de três camadas. Com o avanço tecnológico e o aprimoramento dos computadores, a teoria tem sido aplicada para solução de sistemas multicamadas e vários programas computacionais foram desenvolvidos, facilitando o cálculo automático de tensões, deformações e deslocamentos.

As principais hipóteses para solução de sistemas de camadas elásticas são: (i) as camadas são homogêneas, e os materiais apresentam comportamento linear elástico e isotrópico; (ii) as camadas não têm peso e são ilimitadas na direção horizontal; (iii) todas as camadas possuem uma espessura finita, exceto a camada inferior (subleito), que é considerada semi-infinita; (iv) a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada; (v) na área carregada ocorrem apenas tensões normais; (vi) a carga aplicada é considerada estática e uniformemente distribuída em uma área de contato circular, ou seja, carregamento axissimétrico; (vii) a grandes profundidades, as

tensões e as deformações são nulas; e (viii) as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência (Huang, 2004; Medina e Motta, 2015).

Na condição aderida, as tensões verticais e cisalhantes e os deslocamentos verticais e radiais devem ser os mesmos nas interfaces entre as camadas. Para interfaces sem aderência, apenas as tensões e os deslocamentos verticais são contínuos. As tensões cisalhantes se tornam nulas em ambos os lados da interface e os deslocamentos radiais relativos na interface são descontínuos, porém não nulos. As condições de aderência entre as camadas afetam de forma significativa o dimensionamento, sendo que o efeito da condição de aderência entre a camada de revestimento e a camada subjacente prepondera sobre o efeito das condições de aderência entre as demais camadas (Scherer *et al.*, 2016; Torquato e Silva; Souza e Soares, 2019). Para o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, a interface entre camadas pode ser caracterizada por um módulo de rigidez tangente (K_s), que assume valor nulo para a condição não aderida e tende ao infinito para a condição totalmente aderida (DNIT, 2020).

Quanto maior a rigidez ao cisalhamento da interface, menores são os deslocamentos relativos para um mesmo nível de tensão cisalhante, e maior é a vida útil do pavimento. No entanto, apesar de a aderência total entre camadas ser desejável, não se conhecem atualmente suas condições reais. Por esse motivo, sua consideração pode levar ao subdimensionamento da estrutura. Da mesma

forma, a consideração de interfaces sem nenhuma aderência também é irreal, o que poderia resultar em pavimentos superdimensionados e, conseqüentemente, mais onerosos (Khweir e Fordyce, 2003; Toffoli, 2021). As ferramentas de projeto geralmente dimensionam as estruturas de pavimentos flexíveis, assumindo aderência total entre a camada de revestimento e a camada subjacente (Torquato e Silva, 2017).

Diante do cenário de implementação do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), o presente estudo busca realizar uma simulação comparativa entre as respostas do AEMC e as obtidas no KENLAYER e no ELSYM5, considerando o efeito das condições de aderência na estimativa da vida útil de pavimentos asfálticos.

2. METODOLOGIA

A metodologia empregada tem como finalidade avaliar o efeito das condições de aderência na estimativa da vida útil de um pavimento asfáltico. Para isso, foi proposta uma estrutura de pavimento flexível, que foi analisada considerando e desconsiderando a aderência entre camadas. A vida útil da estrutura proposta nas diferentes condições foi estimada recorrendo a diferentes modelos de previsão de desempenho.

2.1. FERRAMENTAS DE SOLUÇÃO ANALÍTICA

Atualmente, encontra-se disponível uma gama de programas computacionais para o cálculo de deslocamentos, deformações e tensões em pavimentos flexíveis usando a teoria de múltiplas camadas elásticas. Visando validar o MeDiNa em relação a outros programas de análise tensão-deformação, a estrutura proposta foi analisada por três ferramentas: (i) AEMC (pacote MeDiNa); (ii) ELSYM5; e (iii) KENLAYER.

2.1.1. ANÁLISE ELÁSTICA DE MÚLTIPLAS CAMADAS (AEMC)

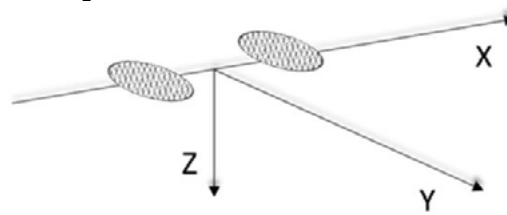
O programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), desenvolvido por Franco (2007), calcula tensões e deformações em estruturas de pavimentos com até oito camadas sob carregamento de rodas do tipo eixo rodoviário. A estrutura geral de cálculo utiliza a integração de Gauss-Laguerre no cálculo das equações integrais, e as hipóteses fundamentais da solução computacional baseiam-se nas mesmas consideradas na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos (DNIT, 2020). Para o perfeito funcionamento do programa, o projetista deve atentar-se para o uso correto das unidades das grandezas físicas utilizadas no programa, conforme o que é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Grandezas e Unidades

Grandeza	Unidade
Espessuras e distâncias	cm
Raio do carregamento	cm
Deslocamentos	µm
Deformações específicas	m/m
Área de contato	cm ²
Pressão de inflação e tensões	MPa
Carga de eixo ou de roda	ton

Fonte: DNIT (2020, p. 18)

O sistema de coordenadas x, y e z assumido no programa é o indicado na Figura 1.

Figura 1 – Sistema de coordenadas AEMC

Fonte: DNIT (2020, p. 19)

Os valores positivos de tensão e deformação normais indicam que o ponto está em compressão, enquanto os valores negativos indicam tração.

Os materiais das diferentes camadas podem ser considerados como elásticos lineares ou não lineares. No que diz respeito às condições de aderência, o programa faz uma modelagem física similar à teoria de molas a fim de permitir o movimento horizontal relativo na interface entre duas camadas. Para simular a aderência entre camadas, o AEMC utiliza um parâmetro adimensional (l) que se relaciona com o módulo de rigidez que resiste ao deslocamento radial relativo ao longo da interface. Para simular a condição não aderida, deve ser atribuído o valor $l = 0$ (zero), e, para a condição totalmente aderida, deve ser atribuído o valor $l = 1$ (um) (DNIT, 2020). A partir desse parâmetro de entrada, seria possível estimar a rigidez tangente (K_s) por meio da seguinte expressão:

$$K_s = \frac{l}{1-l} \quad (1)$$

Apesar de o programa MeDiNa, em sua versão atual, predefinir as condições de aderência com base no tipo e posição das camadas, no AEMC é possível conduzir análises atribuindo valores intermediários ao parâmetro de aderência (l). Entretanto, Toffoli (2021) demonstrou que a rigidez ao cisalhamento (K_s) é pouco sensível ao parâmetro de entrada (l), usando a fórmula da Equação 1, apresentando variações em relação à condição de interface sem aderência a partir de valores de $l = 0,99$.

A carga de roda é assumida no programa como sendo uniformemente distribuída em uma área de contato circular entre o pneu e a superfície do pavimento. A pressão de contato entre o pneu e o pavimento é assumida como sendo igual à pressão de inflação dos pneus, e o tamanho da área de contato depende da carga de roda e da pressão de inflação dos pneus (DNIT, 2020). O programa possibilita a obtenção de deslocamentos, deformações e tensões, sob condições axissimétricas, considerando o eixo padrão rodoviário, eixos simples, eixos duplos, eixos tipo tandem e eixos especiais. Para considerar a influência de mais de um pneu, o programa recorre à superposição de efeitos, apesar de esta hipótese ser questionável para materiais com comportamento não linear (Farias; Monteiro, 1996). Os resultados podem ser obtidos considerando tanto o semieixo como o eixo completo na análise.

2.1.2. ELASTIC LAYER SYSTEM MODEL 5 (ELSYM5)

O *Elastic Layer System Model 5* (ELSYM5), escrito em linguagem Fortran e desenvolvido na Universidade da Califórnia em Berkeley (Kopperman; Tiller; Tseng, 1986), é um dos programas mais utilizados para o cálculo de deslocamentos, deformações e tensões em sistemas de camadas elásticas. As hipóteses básicas relativas ao sistema de camadas elásticas admitidas nesse programa são as mesmas de Burmister, e as condições de contorno e continuidade exigem o contato

contínuo das camadas (considera apenas a condição de total aderência entre camadas) (Pinto e Preussler, 2010; Medina e Motta, 2015).

O ELSYM5 admite cargas verticais uniformemente distribuídas em uma área circular, e o princípio da superposição é utilizado para considerar o efeito de várias cargas, que são caracterizadas por dois de três valores de entrada: carga, pressão do pneu e raio da área carregada (o usuário atribui dois desses valores e o programa calcula o terceiro). Segundo Balbo (2007), o programa é adimensional, bastando apenas que os parâmetros sejam informados em unidades coerentes. O programa pode aceitar um total de cinco camadas e até 10 cargas circulares normais, apresentando os resultados para até 10 profundidades distintas (coordenadas verticais). O sistema tridimensional utiliza as coordenadas x e y , em um plano horizontal, e a coordenada z representa a profundidade no sistema de camadas. A coordenada z é positiva verticalmente para baixo, com a origem na superfície. A convenção de sinais é negativa para tensões e deformações normais de compressão e positiva para tensões e deformações normais de tração (Pinto e Preussler, 2010).

2.1.3. KENLAYER

O programa computacional KENLAYER, desenvolvido e documentado por Huang (2004), é aplicável a pavimentos flexíveis. A função principal do programa é a solução de um sistema de camadas elásticas submetido a um carregamento distribuído em uma área circular (axissimétrico), utilizando regras de quadratura de Gauss para solucionar o sistema de equações. O KENLAYER, juntamente com o programa de entrada LAYERINP e o programa gráfico LGRAPH, é parte de um pacote de programas chamado KENPAVE. O KENPAVE foi

desenvolvido utilizando a linguagem de programação *Visual Basic* e pode ser utilizado em computadores com sistema operacional *Windows 95* ou versões superiores.

O cálculo de tensões e deformações pode ser feito em estruturas com até 19 camadas, em até 10 coordenadas radiais diferentes, e em até 19 profundidades diferentes (coordenadas verticais). O programa permite atribuir comportamento linear elástico, elástico não linear ou viscoelástico para os materiais das diferentes camadas. Além disso, possibilita a análise de dano, e as interfaces entre camadas podem ser especificadas como aderidas ou não aderidas (Huang, 2004).

O carregamento é caracterizado pelo raio da área carregada, pressão de contato e pelo espaçamento entre rodas e entre eixos. As propriedades dos materiais e demais parâmetros para caracterização da estrutura podem ser inseridos considerando o Sistema Internacional de Unidades ou o Sistema Imperial Britânico. O sistema de coordenadas utiliza as coordenadas x e y , no plano horizontal, e as coordenadas z , no plano vertical. A convenção de sinais é positiva para tensões e deformações normais de compressão, e negativa para tensões e deformações normais de tração.

2.2. ESTRUTURA PROPOSTA

Com intuito de comparar os resultados obtidos nos programas citados, tomou-se uma estrutura de pavimento flexível, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 2, assumindo comportamento elástico linear para todas as camadas. Os valores de módulo de Young e coeficiente de Poisson foram propostos com base nas recomendações da Instrução de Projeto IP-DE-00/001 do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER-SP, 2006).

Tabela 2 – Camadas e propriedades dos materiais

Camada	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessura (cm)
Revestimento	3500	0,30	10,0
Base	300	0,35	15,0
Sub-base	250	0,35	20,0
Subleito	100	0,40	-

Fonte: Elaboração própria

2.3. MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO

O impacto das condições de aderência foi avaliado estimando a vida útil do pavimento segundo critérios de fadiga da camada de revestimento e de afundamento de trilha de roda.

A vida de fadiga é um dos principais critérios utilizados no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos e está diretamente relacionada às tensões ou deformações horizontais de tração nas fibras inferiores da camada asfáltica (Yu *et al.*, 2012). Alguns modelos de desempenho também relacionam a vida de fadiga com as propriedades da mistura asfáltica, como módulo de elasticidade, temperatura, e composição da mistura (Pinto e Preussler, 2010; Elnashar, Bhat e Sedaghati, 2019). A relação entre a vida de fadiga

e a deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento, sob o centro de aplicação da carga de uma das rodas, foi analisada conforme a expressão a seguir:

$$N_{f1} = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \quad (2)$$

onde N_{f1} é o número de repetições da carga para ruptura por fadiga, ε_t é a deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento, e k_1 e k_2 são coeficientes experimentais determinados por regressão. Os modelos de previsão de vida de fadiga propostos na instrução de projeto IP-DE-00/001 (DER-SP, 2006) foram utilizados para estimativa de N_{f1} . Os coeficientes de cada modelo, para deformação adimensional (em decimais), são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes dos modelos de vida de fadiga recomendados pelo DER-SP (2006)

Modelo	Autor	Ano	k_1	k_2
A	<i>Federal Highway Administration</i>	1976	$1,092 \times 10^{-6}$	3,512
B	<i>Asphalt Institute</i>	1976	$2,961 \times 10^{-5}$	3,291
C	Barker, Brabston & Chou	1977	$9,7 \times 10^{-10}$	4,03
D	Pinto & Preussler	1980	$2,85 \times 10^{-7}$	3,69

Fonte: DER-SP (2006, p. 25)

Ao utilizar as equações recomendadas pela instrução de projeto IP-DE-00/001 (DER-SP, 2006), deve-se considerar que o N_{f1} obtido é correspondente ao prescrito pela metodologia da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), e que a expressão do *Asphalt Institute* foi simplificada para se ajustar ao formato da Equação 2,

adotando um módulo de Young de 3000 Mpa, volume de betume de 13,5 % e volume de vazios de 4 %.

O desempenho quanto à fadiga também foi avaliado com base no máximo deslocamento vertical recuperável no topo do revestimento, pelo modelo de desempenho proposto por Elliott e Thompson (1985), conforme a expressão a

seguir:

$$N_{f2} = 5,6 \times 10^{11} \times \frac{1}{U_v^{4,6}} \quad (3)$$

onde N_{f2} é a vida útil do pavimento e U_v é o deslocamento vertical recuperável medido no topo do revestimento, expresso em 10^{-3} polegadas.

A previsão de desempenho para o critério de deformação permanente em função da deformação elástica vertical atuante no topo do subleito foi feita conforme a expressão a seguir:

$$N_{f3} = k_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_v} \right)^{k_4} \quad (4)$$

onde N_{f3} é o número equivalente de solicitações da carga do eixo rodoviário, ε_v é a deformação vertical de compressão no topo do subleito, e k_3 e k_4 são coeficientes experimentais determinados por regressão. Os modelos de previsão de vida útil, segundo esse critério, foram os propostos pela instrução de projeto IP-DE-00/001 (DER-SP, 2006) para estimativa de N_{f3} . Os coeficientes de cada modelo, para deformação adimensional (em decimais), são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes dos modelos para determinação do limite de ruptura plástica

Modelo	Autor	Ano	k_3	k_4
A	Dormon & Metcalf	1965	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762
B	Shell (50% de confiabilidade)	1985	$6,15 \times 10^{-7}$	4,0
C	Shell (85% de confiabilidade)	1985	$1,94 \times 10^{-7}$	4,0
D	Shell (95% de confiabilidade)	1985	$1,05 \times 10^{-7}$	4,0
E	Santucci	1984	$1,338 \times 10^{-9}$	4,484

Fonte: DER-SP (2006, p. 26)

Ao utilizar as equações recomendadas pelo DER-SP (2006), deve-se considerar que o N_{f3} obtido é correspondente ao prescrito pela metodologia da *United States Army Corps of Engineers* (USACE).

2.4. ETAPAS E CENÁRIOS DE ANÁLISE

Para atingir os objetivos propostos, o presente estudo foi dividido em duas etapas: (i) etapa de comparação entre o AEMC e outros programas computacionais; e (ii) etapa de análise do efeito das condições de aderência. Em todas as etapas foram consideradas duas condições extremas de aderência: interfaces aderidas, designadas como AD, e interfaces não aderidas, designadas como NAD.

Na etapa de comparação, foram obtidos os valores de tensão, deformação e deslocamento ao longo da espessura das camadas, considerando um semieixo simples (eixo simples com roda simples). Os resultados obtidos por

cada uma das ferramentas de análise foram comparados entre si de forma qualitativa e quantitativa. Na análise quantitativa decidiu-se pela avaliação das bacias de deslocamentos verticais e dos valores de deformação horizontal por serem parâmetros comumente utilizados em modelos de previsão de desempenho (Pinto e Preussler, 2010).

A proximidade entre as bacias de deslocamento vertical obtida para uma mesma condição de aderência foi avaliada pela raiz quadrática média dos erros percentuais (RMSE), expressa por:

$$RMSE(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{calculada} - d_{referência}}{d_{referência}} \right)^2} \quad (5)$$

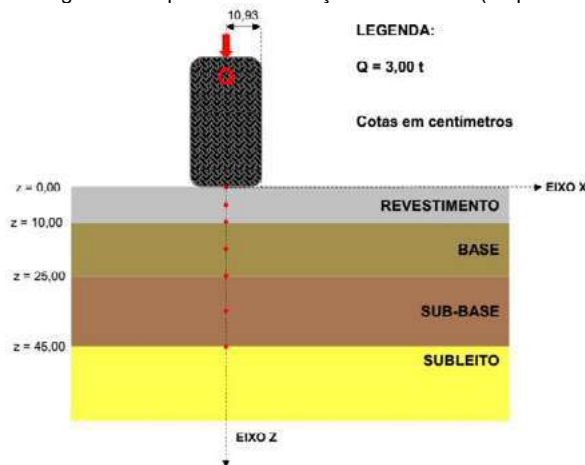
onde n é o número de pontos de deslocamentos na bacia, $d_{calculada}$ é o valor de deslocamento obtido com as ferramentas de solução analítica (KENLAYER ou ELSYM5), e $d_{referência}$ é o valor

de deslocamento de referência, obtido no AEMC. Quanto menor o valor de RMSE, melhor o grau de aproximação entre as bacias (Silvério, 2021).

Na Figura 2, apresentam-se, de forma esquemática, as características do carregamento e a localização dos pontos na estrutura para

obtenção dos deslocamentos, deformações e tensões, na etapa de comparação. Nos limites das camadas os resultados, foram obtidos na interface e em pontos imediatamente acima e imediatamente abaixo ($\Delta_z = \pm 0,01 \text{ cm}$).

Figura 2 – Carregamento e pontos de avaliação na estrutura (etapa de comparação)



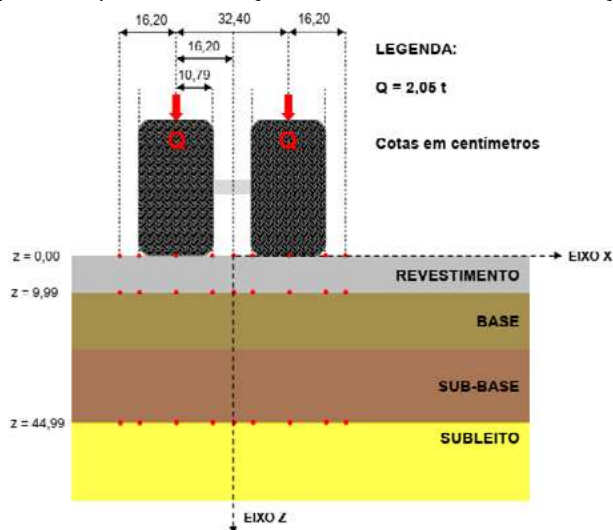
Fonte: Elaboração própria

Na etapa de análise do efeito das condições de aderência, foram considerados apenas os valores obtidos pelo AEMC. Foram calculadas as deformações horizontais, deslocamentos e deformações verticais na superfície e nas interfaces, considerando o semieixo rodoviário padrão. Os resultados obtidos para cada condição de aderência foram comparados, estimando-se a

vida útil do pavimento por meio dos modelos de previsão de desempenho.

As características do carregamento e a localização dos pontos na estrutura para obtenção dos deslocamentos, deformações e tensões, na etapa de análise do efeito das condições de aderência, são apresentados de forma esquemática na Figura 3.

Figura 3 – Carregamento e pontos de avaliação na estrutura na análise das condições de aderência



Fonte: Elaboração própria

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

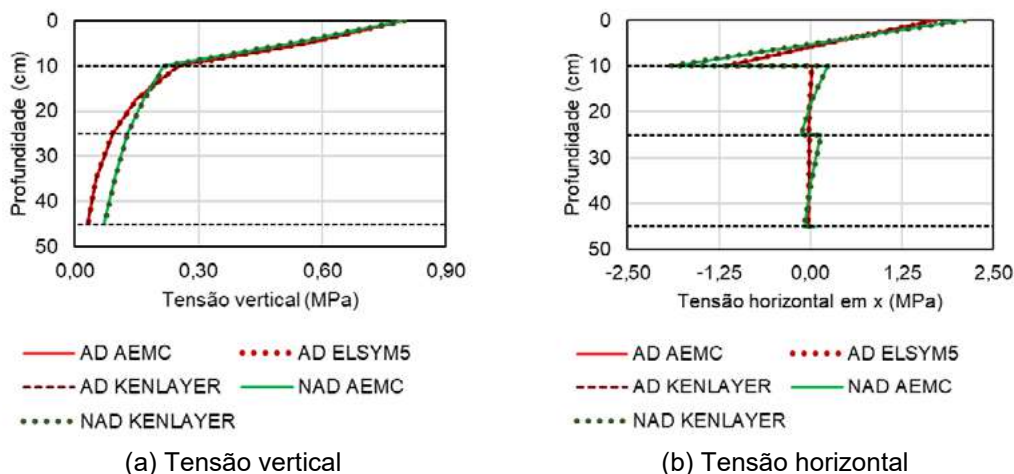
Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos considerando a estrutura e os cenários propostos. Primeiramente, é apresentada a comparação dos cálculos mecanísticos do AEMC, e, na sequência, é feita uma análise do impacto das condições de aderência.

3.1. COMPARAÇÃO ENTRE O AEMC E OUTROS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Nas Figuras 4, 5 e 6, apresenta-se o comparativo entre os valores de tensões,

deformações e deslocamentos, obtidos pelos diferentes programas computacionais, ao longo da espessura do pavimento, comparando as condições AD e NAD para um carregamento de semieixo com roda simples. Os valores obtidos foram convertidos de forma a se tornarem compatíveis com o sistema de unidade, o sistema de coordenadas e a convenção de sinais do AEMC.

Figura 4 – Tensões verticais e horizontais (aderido AD versus não aderido NAD)



(a) Tensão vertical

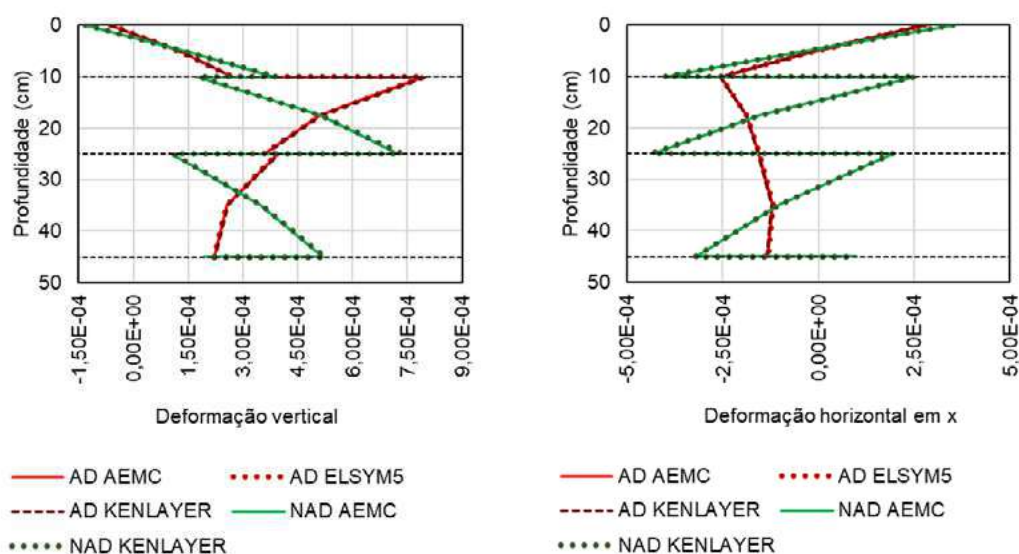
(b) Tensão horizontal

Fonte: Elaboração própria

Figura 5 – Deformações verticais e horizontais (aderido AD versus não aderido NAD)

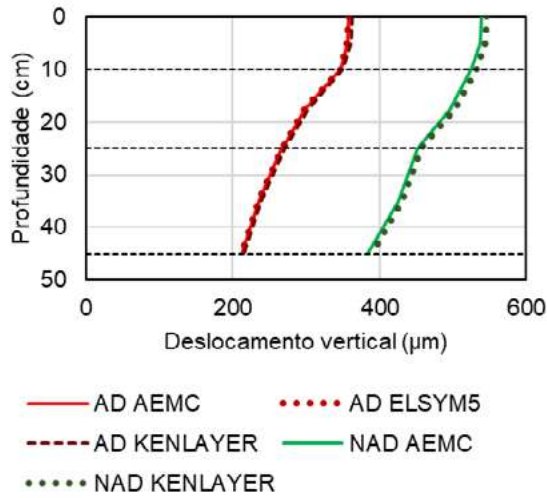
(a) Deformação vertical

(b) Deformação horizontal



Fonte: Elaboração própria

Figura 6 – Deslocamentos verticais (aderido AD versus não aderido NAD)



Fonte: Elaboração própria

De modo geral, observa-se que os gráficos obtidos pelas diferentes ferramentas apresentam o mesmo comportamento, tanto para a condição aderida (AD), como para a condição não-aderida (NAD). Por se tratar de um carregamento simples (semieixo simples e roda simples), para a coordenada radial igual a 0 (zero), as tensões e deformações horizontais em y são iguais às tensões e deformações horizontais em x.

Como esperado, as tensões e os deslocamentos verticais são contínuos nos limites das camadas nas duas condições de aderência avaliadas; e diferentemente da condição aderida (AD), na condição não aderida (NAD) as

deformações horizontais se tornam descontínuas nas interfaces. Nas Tabelas 5 e 6 apresentam-se respectivamente a variação dos valores de deformação horizontal e deslocamento vertical no topo da camada de revestimento e nas interfaces entre camadas, para a condição aderida (AD).

Em linhas gerais observa-se pouca variação nos valores obtidos pelas diferentes ferramentas de análise tensão-deformação. Para a condição aderida (AD), o comparativo qualitativo entre os gráficos e a pequena diferença entre os valores avaliados validam o AEMC em relação a outros programas computacionais, como KENLAYER e ELSYM5.

Tabela 5 – Variação das deformações horizontais - condição aderida, AD

z (cm)	AEMC (referência)	ELSYM5	Diferença [(2)-(1)]/(1) (%)	KENLAYER	Diferença [(3)-(1)]/(1) (%)
	(1)	(2)		(3)	
0,00	2,74E-04	2,77E-04	1,09	2,74E-04	0,00
9,99	-2,55E-04	-2,55E-04	0,00	-2,57E-04	0,78
10,00	-2,55E-04	-2,56E-04	0,39	-2,57E-04	0,78
10,01	-2,55E-04	-2,56E-04	0,39	-2,57E-04	0,78
24,99	-1,56E-04	-1,55E-04	-0,64	-1,58E-04	1,28
25,00	-1,56E-04	-1,55E-04	-0,64	-1,57E-04	0,64
25,01	-1,56E-04	-1,55E-04	-0,64	-1,57E-04	0,64
44,99	-1,33E-04	-1,32E-04	-0,75	-1,35E-04	1,50
45,00	-1,33E-04	-1,32E-04	-0,75	-1,35E-04	1,50
45,01	-1,33E-04	-1,32E-04	-0,75	-1,35E-04	1,50

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6 – Variação dos deslocamentos verticais (μm) - condição aderida, AD

z (cm)	AEMC (referência)	ELSYM5	Diferença	KENLAYER	Diferença
	(1)	(2)	[(2)-(1)]/(1) (%)	(3)	[(3)-(1)]/(1) (%)
0,00	358,7	358,0	-0,20	362,7	1,12
9,99	346,8	347,0	0,06	351,1	1,24
10,00	346,7	347,0	0,09	351,0	1,24
10,01	346,6	346,0	-0,17	351,0	1,27
24,99	266,9	267,0	0,04	270,4	1,31
25,00	266,9	267,0	0,04	270,4	1,31
25,01	266,8	267,0	0,07	270,4	1,35
44,99	212,2	212,0	-0,09	215,1	1,37
45,00	212,2	212,0	-0,09	215,1	1,37
45,01	212,2	212,0	-0,09	215,0	1,32

Fonte: Elaboração própria

Nas Tabelas 7 e 8 apresentam-se no topo da camada de revestimento e nas respectivas a variação dos valores de interfaces, para a condição não-aderida (NAD). deformação horizontal e de deslocamento vertical

Tabela 5 – Variação das deformações horizontais - condição não aderida, NAD

z (cm)	AEMC (referência)	KENLAYER	Diferença
	(1)	(2)	[(2)-(1)]/(1) (%)
0,00	3,52E-04	3,53E-04	0,28
9,99	-3,99E-04	-4,02E-04	0,75
10,00	2,53E-04	-4,03E-04	--
10,01	2,52E-04	2,55E-04	1,19
24,99	-4,32E-04	-4,37E-04	1,16
25,00	1,92E-04	-4,37E-04	--
25,01	1,91E-04	1,94E-04	1,57
44,99	-3,19E-04	-3,23E-04	1,25
45,00	9,80E-05	-3,23E-04	--
45,01	9,77E-05	9,90E-05	1,33

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6 – Variação dos deslocamentos verticais (μm) - condição não aderida, NAD

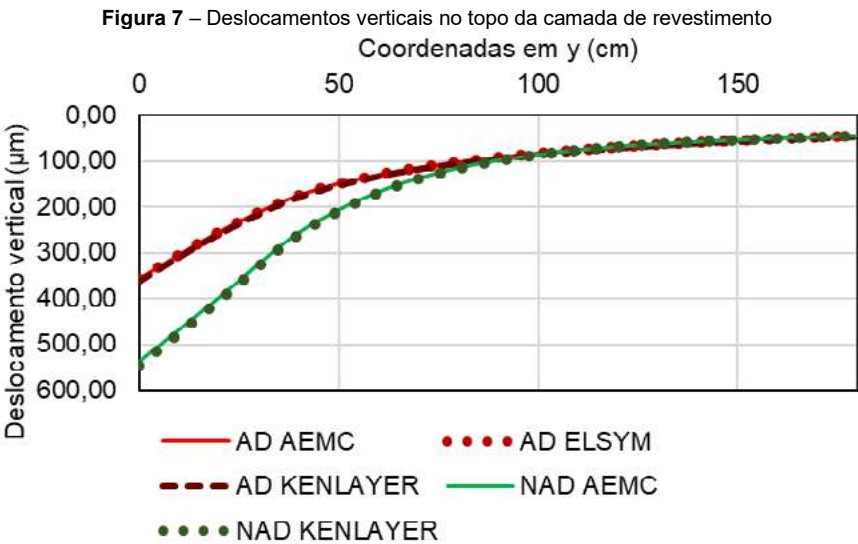
z (cm)	AEMC (referência)	KENLAYER	Diferença
	(1)	(2)	[(2)-(1)]/(1) (%)
0,00	539,2	545,6	1,19
9,99	525,5	532,2	1,27
10,00	525,4	532,1	1,28
10,01	525,4	532,1	1,28
24,99	451,4	457,4	1,33
25,00	451,4	457,3	1,31
25,01	451,3	457,3	1,33
44,99	383,6	388,8	1,36
45,00	383,6	388,7	1,33
45,01	383,5	388,7	1,36

Fonte: Elaboração própria

Para a condição sem aderência (NAD), o comparativo qualitativo entre os gráficos apresentados também valida o AEMC comparando-se os valores obtidos com o uso do KENLAYER. No que diz respeito aos deslocamentos verticais, assim como para a condição aderida (AD), observa-se uma pequena variação entre os valores na superfície e nas interfaces. Em relação às deformações horizontais, observa-se uma grande variação dos valores exatamente nas interfaces, enquanto deformações horizontais obtidas no AEMC são de compressão, as deformações horizontais obtidas no KENLAYER são de tração. A rigor, o valor é

indefinido por se tratar de uma descontinuidade. No entanto, a variação dos valores de deformação horizontal para pontos imediatamente abaixo e imediatamente acima da interface ($\Delta_z = \pm 0,01\text{ cm}$) é baixa, o que ratifica o comportamento observado nos gráficos apresentados.

As bacias de deslocamentos verticais na superfície da camada de revestimento ($z = 0,00$) obtidas no AEMC, KENLAYER e ELSYM5 para as duas condições de aderência avaliadas são apresentadas na Figura 7 e nas Tabelas 9 e 10. Para gerar as bacias, foram obtidos os deslocamentos em 10 pontos ao longo do eixo y.



Fonte: Elaboração própria

Tabela 9 – Deflexões e RMSE para a condição aderida, AD ($1\text{ }\mu\text{m} = 0,1 \times 10^{-2}\text{ mm}$)

y (cm)	Deflexões (μm)		RMSE (%)	Deflexões (μm)	
	AEMC (referência)	ELSYM5		KENLAYER	RMSE (%)
0,00	358,66	358,00	0,11	362,70	1,33
20,00	256,27	256,00		259,80	
40,00	175,82	176,00		178,20	
60,00	131,07	131,00		132,90	
80,00	103,16	103,00		104,60	
100,00	84,01	84,10		85,20	
120,00	70,16	70,20		71,10	
140,00	59,83	59,90		60,60	
160,00	51,94	52,00		52,60	
180,00	45,79	45,80		46,40	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 – Deflexões e RMSE para a condição não-aderida, NAD ($1 \mu\text{m} = 0,1 \times 10^{-2} \text{ mm}$)

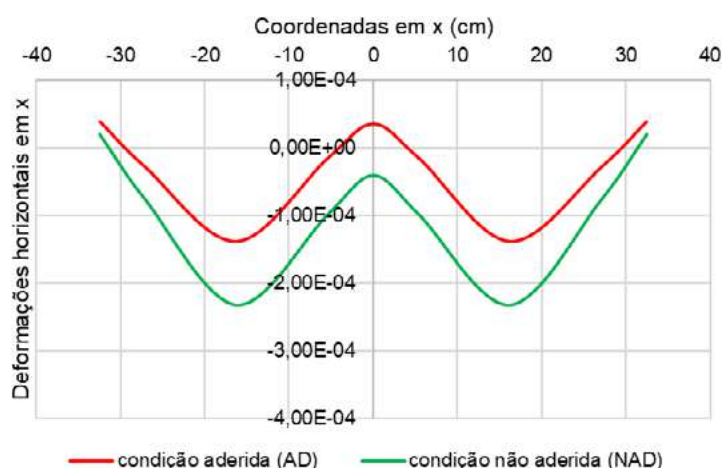
y (cm)	Deflexões (μm)		RMSE (%)
	AEMC (referência)	KENLAYER	
0,00	539,20	545,60	1,35
20,00	399,26	404,70	
40,00	256,83	260,40	
60,00	166,90	169,20	
80,00	114,69	116,30	
100,00	85,10	86,30	
120,00	67,89	68,80	
140,00	57,16	57,90	
160,00	49,81	50,50	
180,00	44,32	44,90	

Fonte: Elaboração própria

A análise qualitativa das bacias apresentadas na Figura 7 e os baixos valores de RMSE corroboram a validação do AEMC em relação a outros programas de análise de tensão-deformação. Os valores de RMSE obtidos indicam boa correlação entre as bacias, segundo os critérios do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2020) e da *American Society for Testing and Materials* (1996).

3.2. ANÁLISE COMPARATIVA DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA

Na sequência, são apresentados os resultados obtidos no AEMC para os valores de interesse na análise mecânica da estrutura, comparando-se as condições AD e NAD para um carregamento de semieixo com as de roda dupla. Na Figura 8 e na Tabela 11 são apresentados os valores de deformação horizontal (ϵ_x) na fibra inferior (imediatamente acima da interface, $\Delta_z = -0,01 \text{ cm}$) da camada de revestimento.

Figura 8 – Representação gráfica de ϵ_x na fibra inferior da camada de revestimento

Fonte: Elaboração própria

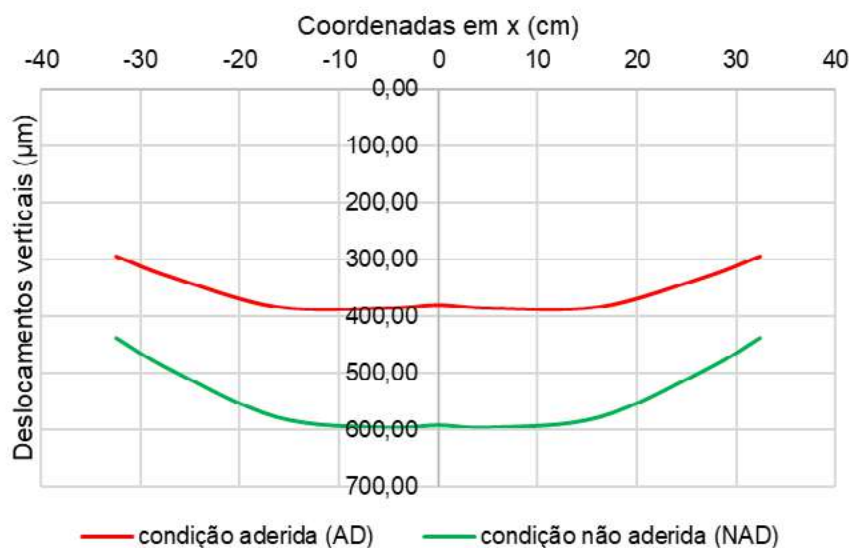
Tabela 11 – Deformações horizontais na fibra inferior da camada de revestimento

Coordenadas			ε_x		Diferença (%) [(2)-(1)]/(1)
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Aderido (AD) (1)	Não aderido (NAD) (2)	
-32,40	0,00	9,99	3,79E-05	1,95E-05	-48,55
-26,99	0,00	9,99	-2,99E-05	-7,71E-05	157,86
-16,20	0,00	9,99	-1,40E-04	-2,32E-04	65,71
-5,41	0,00	9,99	-1,65E-05	-9,87E-05	498,18
0,00	0,00	9,99	3,44E-05	-4,07E-05	--
5,41	0,00	9,99	-1,65E-05	-9,87E-05	498,18
16,20	0,00	9,99	-1,40E-04	-2,32E-04	65,71
26,99	0,00	9,99	-2,99E-05	-7,71E-05	157,86
32,40	0,00	9,99	3,79E-05	1,95E-05	-48,55

Fonte: Elaboração própria

De acordo com o valores obtidos, nos centros de aplicação da carga ($x = -16,20$ cm e $x = 16,20$ cm), verifica-se que, na condição não aderida, a deformação horizontal de tração na direção x é cerca de 66 % superior ao valor

observado na condição aderida. O mesmo comportamento foi percebido ao analisar as deflexões na superfície do pavimento (U_v), cujos valores são apresentados na Figura 9 e na Tabela 12.

Figura 9 – Representação gráfica dos deslocamentos verticais no topo da camada de revestimento

Fonte: Elaboração própria

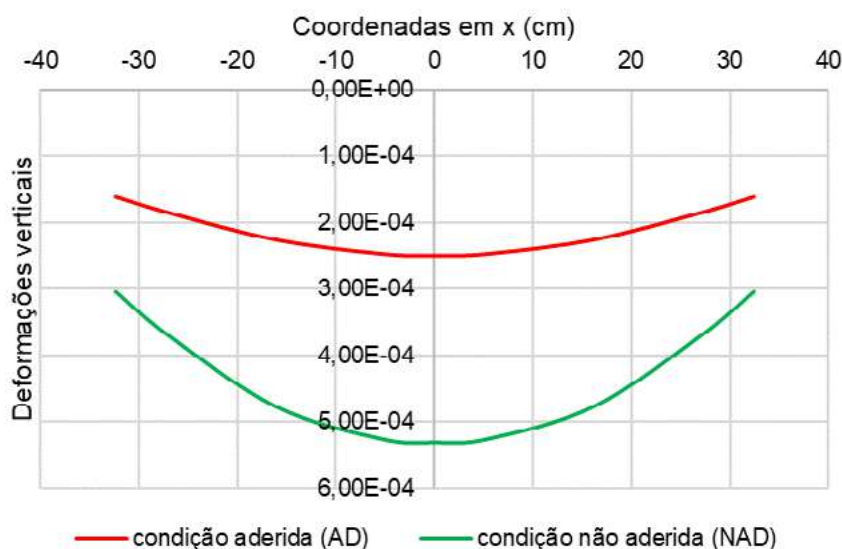
Tabela 12 – Deslocamentos verticais no topo da camada de revestimento ($1 \mu\text{m} = 0,1 \times 10^{-2} \text{ mm}$)

Coordenadas			$U_v (\mu\text{m})$		Diferença (%) [(2)-(1)]/(1)
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Aderido (AD) (1)	Não aderido (NAD) (2)	
-32,40	0,00	0,00	294,81	440,44	49,40
-26,99	0,00	0,00	330,16	494,41	49,75
-16,20	0,00	0,00	382,91	577,24	50,75
-5,41	0,00	0,00	385,45	594,63	54,27
0,00	0,00	0,00	379,67	590,57	55,55
5,41	0,00	0,00	385,45	594,63	54,27
16,20	0,00	0,00	382,91	577,24	50,75
26,99	0,00	0,00	330,16	494,41	49,75
32,40	0,00	0,00	294,81	440,44	49,40

Fonte: Elaboração própria

Com base nos resultados apresentados, observa-se que os deslocamentos no topo da camada de revestimento na condição não aderida são cerca de 50 % maiores que os valores observados para a condição aderida, considerando a estrutura proposta. Isso certamente trará implicações na determinação de módulos por retroanálise com o BackMeDiNa, caso seja considerada uma ou outra condição extrema de aderência.

Os resultados das deformações verticais no topo do subleito são apresentados na Figura 10 e na Tabela 13. Os valores de deformação vertical (ε_v) na condição não aderida são maiores que na condição totalmente aderida. Na condição de camadas aderidas, o revestimento se comporta de forma mais rígida, absorvendo mais tensões verticais e transmitindo uma parcela menor para as camadas inferiores, como pode ser observado na Figura 4(a), na profundidade $z = 45 \text{ cm}$.

Figura 10 – Representação gráfica das deformações verticais no topo do subleito

Fonte: Elaboração própria

Tabela 13 – Deformações verticais no topo do subleito

Coordenadas			ϵ_v		Diferença (%) [(2)-(1)]/(1)
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Aderido (AD) (1)	Não aderido (NAD) (2)	
-32,40	0,00	44,99	1,62E-04	3,04E-04	87,65
-26,99	0,00	44,99	1,86E-04	3,70E-04	98,92
-16,20	0,00	44,99	2,26E-04	4,76E-04	110,62
-5,41	0,00	44,99	2,47E-04	5,26E-04	112,96
0,00	0,00	44,99	2,50E-04	5,31E-04	112,40
5,41	0,00	44,99	2,47E-04	5,26E-04	112,96
16,20	0,00	44,99	2,26E-04	4,76E-04	110,62
26,99	0,00	44,99	1,86E-04	3,70E-04	98,92
32,40	0,00	44,99	1,62E-04	3,04E-04	87,65

Fonte: Elaboração própria

Com base nos resultados apresentados, observa-se que as deformações verticais no topo do subleito, imediatamente acima da interface, são cerca de 100 % maiores para a condição não aderida.

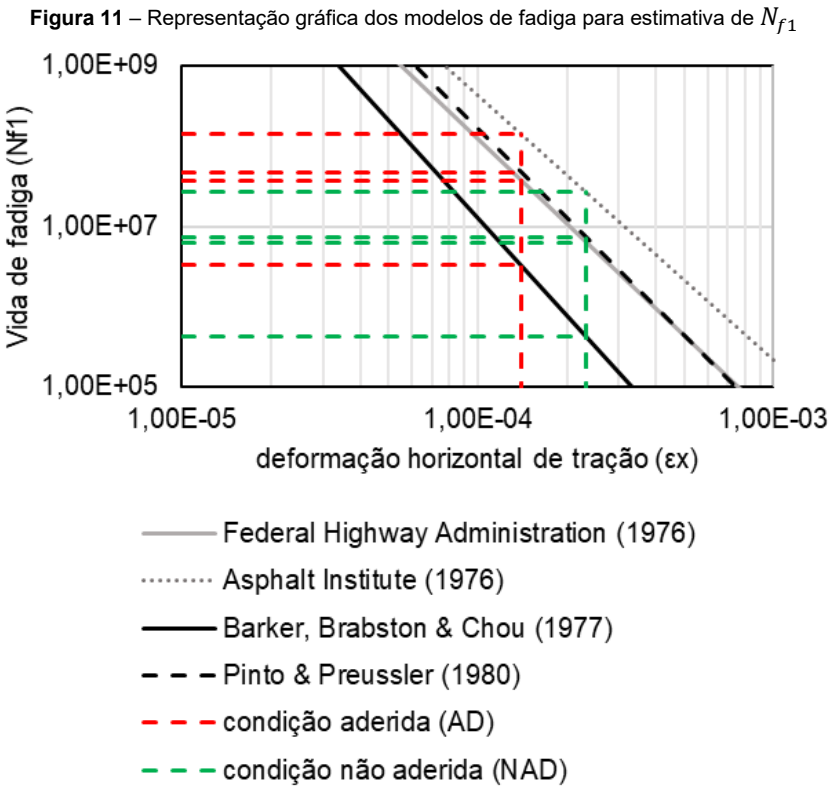
Em resumo, com base no comparativo apresentado, são observados maiores deslocamentos verticais, uma maior deformação horizontal de tração nos centros de aplicação do carregamento na fibra inferior da camada de revestimento, e uma maior deformação vertical no topo do subleito para a condição não aderida (NAD).

Na versão atual do MeDiNa, disponível para *download*, as condições de aderência são pré-estabelecidas em função do material e da posição da camada, existindo apenas as condições de interfaces sem aderência e totalmente aderidas. As únicas situações de total aderência são: (i) camada asfáltica sobre outra camada asfáltica; (ii) camada asfáltica sobre camada antirreflexão de trincas; e (iii) tratamento superficial sobre

camadas asfálticas. Sendo assim, a condição não aderida (NAD) é a que representa o comportamento da estrutura proposta ao ser analisada no MeDiNa.

3.3. EFEITO DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA NO DIMENSIONAMENTO

Buscando ampliar o entendimento dos efeitos da consideração de interfaces aderidas ou não aderidas no dimensionamento de um pavimento, a vida útil da estrutura proposta foi estimada recorrendo aos modelos de desempenho descritos no item 2.3, considerando a carga de um semieixo simples padrão rodoviário (ESP). Na Figura 11 e na Tabela 14, apresenta-se a estimativa da vida de fadiga, calculada com base na deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento nos centros de aplicação da carga no eixo x: $1,40 \times 10^{-4}$ e $2,32 \times 10^{-4}$, para as condições aderida (AD) e não aderida (NAD), respectivamente.



Fonte: Elaboração própria

Tabela 14 – Vida de fadiga estimada com base na ϵ_x na fibra inferior da camada de revestimento (N_{f1})

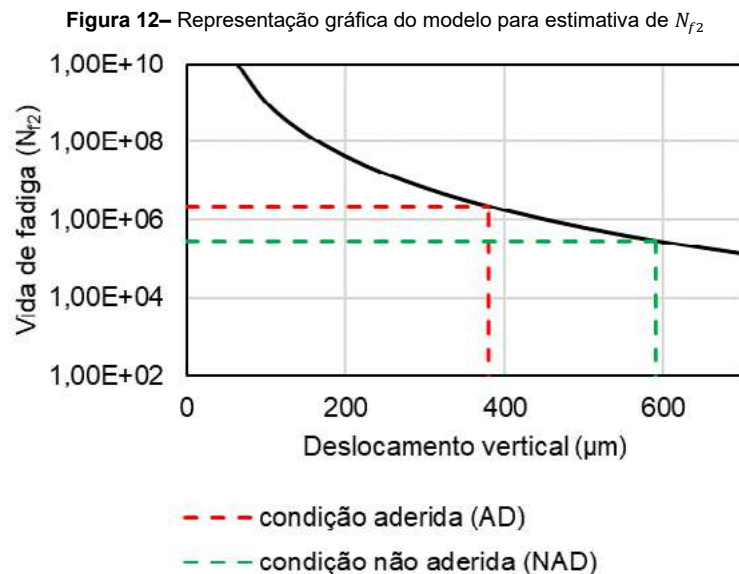
Modelo	Autor	N_{f1}		Diferença (%) [(2)-(1)]/(1)
		Aderido (AD) (1)	Não aderido (NAD) (2)	
A	<i>Federal Highway Administration</i>	3,74E+07	6,35E+06	-83,02
B	<i>Asphalt Institute</i>	1,43E+08	2,71E+07	-81,05
C	Barker, Brabston & Chou	3,30E+06	4,30E+05	-86,97
D	Pinto & Preussler	4,74E+07	7,35E+06	-84,49

Fonte: Elaboração própria

De modo geral, o número de passadas do ESP para atingir a vida de fadiga é cerca de 80 % a 90 % menor para a condição não aderida (NAD) em relação à condição de interfaces totalmente aderidas (AD).

O mesmo comportamento foi observado recorrendo à Equação 3 para previsão de desempenho do pavimento com base no

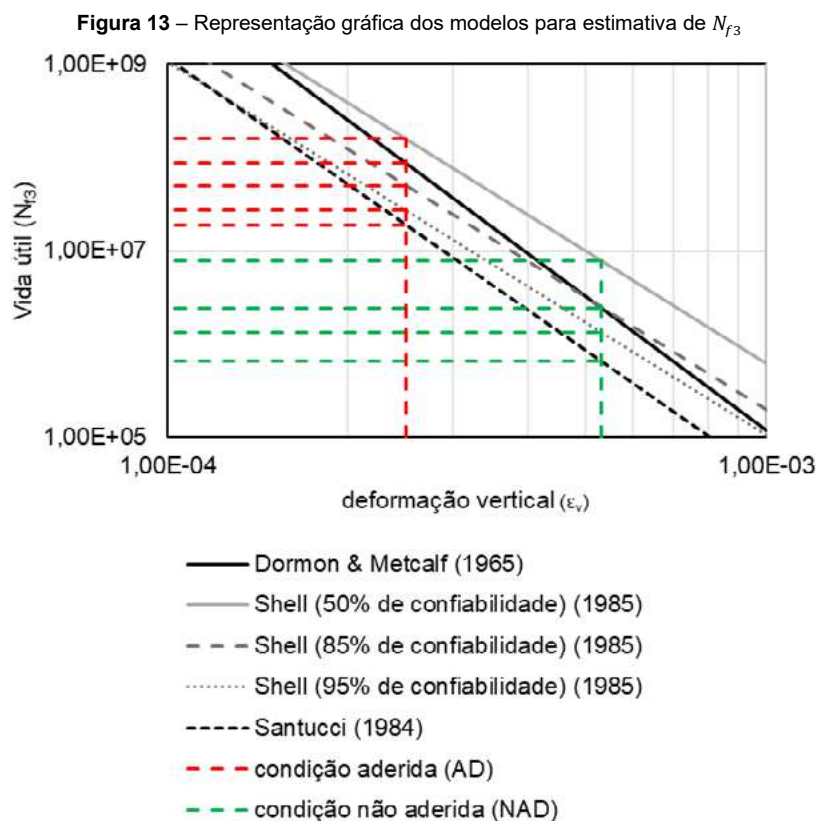
deslocamento vertical na superfície do revestimento. A estimativa de vida útil em função da deflexão máxima medida entre os pneus da roda dupla do eixo padrão rodoviário é apresentada na Figura 12. A deflexão obtida no AEMC para as condições aderida (AD) e não aderida (NAD) é igual a 379,67 μm e 590,57 μm , respectivamente.



Fonte: Elaboração própria

Para a condição de interfaces totalmente aderidas, a vida de fadiga estimada foi de $2,21 \times 10^6$ ciclos de carga, e, para a condição de interfaces não aderidas, a vida de fadiga estimada foi de $2,90 \times 10^5$ ciclos de carga.

A estimativa de vida útil em função da deformação vertical atuante no topo do subleito é apresentada na Figura 13 e na Tabela 15. A deformação vertical máxima para as condições aderida (AD) e não aderida (NAD) é igual a $2,50 \times 10^{-4}$ e $5,31 \times 10^{-4}$, respectivamente.



Fonte: Elaboração própria

Tabela 15 – Vida útil estimada com base na ε_v no topo do subleito (N_{f3})

Modelo	Autor	N_B		Diferença (%) [(2)-(1)]/(1)
		Aderido (AD) (1)	Não aderido (NAD) (2)	
A	Dormon & Metcalf	8,63E+07	2,39E+06	-97,23
B	Shell (50% de confiabilidade)	1,57E+08	7,74E+06	-95,07
C	Shell (85% de confiabilidade)	4,97E+07	2,44E+06	-95,09
D	Shell (95% de confiabilidade)	2,69E+07	1,32E+06	-95,09
E	Santucci	1,90E+07	6,47E+05	-96,59

Fonte: Elaboração própria

A vida útil calculada pelos modelos baseados na deformação vertical no topo do subleito para a condição não-aderida (NAD) foi menor que para a condição aderida (AD), requerendo um número de passadas do ESP cerca de 95 % menor para atingir a condição de ruptura. Apesar de, em alguns casos, a vida de serviço estimada por esse critério (de deformação permanente) ser maior do que a prevista pelos demais critérios avaliados, vale ressaltar que, no Brasil, o principal defeito nos pavimentos flexíveis é o trincamento por fadiga, ou seja, na maioria dos casos, os pavimentos atingem os valores admissíveis de área trincada primeiro que os valores toleráveis de afundamento de trilha de roda (Pinto e Preussler, 2010).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para uma mesma condição de aderência, observa-se uma concordância significativa entre os comportamentos dos gráficos de deslocamento, tensão e deformação gerados com os valores provenientes do AEMC e aqueles oriundos dos outros *softwares* estudados. Em linhas gerais, isso valida a rotina de cálculo das

variáveis mecânicas (deslocamentos, deformações e tensões) no programa MeDiNa (AEMC), em relação aos valores teóricos decorrentes da teoria de múltiplas camadas elásticas.

De modo geral, os deslocamentos, deformações e tensões obtidas para a condição de interfaces não aderidas são mais elevadas em valores absolutos. Nesse sentido, as condições de aderência pré-definidas na versão atual do programa MeDiNa, disponível para *download*, são conservadoras e favoráveis à segurança. No entanto, essas condições podem gerar impactos econômicos significativos em termos de custo de implantação da rodovia.

O impacto das condições de aderência nas interfaces é melhor percebido ao estimar a vida de serviço do pavimento recorrendo a modelos de desempenho. Entre os modelos de desempenho avaliados, o modelo baseado no máximo deslocamento vertical recuperável no topo do revestimento se apresentou como o mais rigoroso, prevendo a menor vida útil nas duas condições de aderência avaliadas.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5858 – 96** – Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory. 1996. 7 p.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.
- BURMISTER, D. M. **The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways**. Proceedings, Highway Research Board, v. 23, p. 126-144, 1943.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **IP – DE – P00/001: Projeto de Pavimentação**. São Paulo: Secretaria dos Transportes. 2006. 53 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro. 2020. 78 p.

ELLIOTT, R. P.; THOMPSON, M. R. **Mechanistic Design Concepts for Conventional Flexible Pavements**. Transportation Engineering Series N° 42. University of Illinois, Urbana, Illinois, United States, 1985.

ELNASHAR, G.; BHAT, R. B.; SEDAGHATI, R. Modeling pavement damage and predicting fatigue cracking of flexible pavements based on a combination of deterministic method with stochastic approach using Miner's hypothesis. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 229, p. 574-579, 2019.

FARIAS, M. M.; MONTEIRO, S. A. **Comparação entre análises bidimensionais axissimétricas com superposição de efeitos e análises tridimensionais aplicadas ao cálculo de tensões em pavimentos**. 30° Reunião Anual de Pavimentação, RAPv, Salvador, Bahia, Brasil, 1996.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. New Jersey: Pearson Education, 2004. 775 p.

KHWEIR, K.; FORDYCE, D. Influence of layer bonding on the prediction of pavement life. **Transport**, v. 156, n. 2, p. 73-83, 2003.

KOPPERMAN, S.; TILLER, G.; TSENG, M. **ELSYM5 Interactive microcomputer version**: User's manual for IBM-PC and compatible microcomputer. FHWA-TS-87-206. United States Department of Transportation. Federal Highway Administration, 1986.

LOULIZI, A.; AL-QADI, I. L.; ELSEIFI, M. Difference between In Situ Flexible Pavement Measured and Calculated Stresses and Strains. **Journal of Transportation Engineering**, v. 132, n. 7, p. 574-579, 2006.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. 620 p.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro: Synergia, 2010. 220 p.

SCHERER, R. G. et al. **Influência da aderência entre camadas no desempenho esperado de pavimentos asfálticos**. 30° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, ANPET, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2016

SILVÉRIO, L. C. **Análise empírico-mecanística de pavimento asfáltico para verificação da influência dos módulos resilientes nos parâmetros de deformabilidade das camadas do pavimento e subleito**. 2021. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2021.

TOFFOLI, C. M. **Dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos: influência da condição de aderência na interface**. 2021. 80 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2021.

TORQUATO E SILVA, S. A. **Modelagem mecanístico-empírica da interface revestimento asfáltico-base granular**. 2017. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2017.

TORQUATO E SILVA, S. A.; SOUZA, W. A. R.; SOARES, J. B. **Método simplificado para a consideração da aderência entre camadas no dimensionamento de pavimentos asfálticos**. 33° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, ANPET, Balneário Camboriú, Santa Catarina, Brasil, 2019.

YU, J.; TSAI, B.; ZHANG, X.; MONISMITH, C. Development of asphalt pavement fatigue cracking prediction model based on loading mode transfer function. **Road Materials and Pavement Design**, v. 13, n. 3, p. 501-517, 2012.

ANÁLISE COMPARATIVA ESTRUTURAL E DE CUSTOS APLICADA AOS PROJETOS-TIPO DE GALERIAS CELULARES PRÉ-MOLDADAS (ADUELAS) PARA OBRAS RODOVIÁRIAS

STRUCTURAL AND COST COMPARISON ANALYSIS APPLIED TO THE REVISION OF PRECAST BOX CULVERTS STANDARD PROJECTS FOR ROADWORKS

Mariane Sisdelli de Oliveira- marianesoliv@gmail.com - <https://orcid.org/0009-0009-1780-0219>

Alirio Brasil Gimenez aliriogimenez@gmail.com - <https://orcid.org/0009-0006-9276-3786>

Pedro Jorge Chama Neto presidencia@abtc.com.br - <https://orcid.org/0009-0001-0989-1159>

Carolina Yumi Ito da Silva tecnico.abtc@abtc.com.br <https://orcid.org/0009-0004-7465-125X>

Bruna Brunetta Toscano- atendimento.abtc@abtc.com.br- <https://orcid.org/0009-0006-2079-2967>

RESUMO: De acordo com o Manual de implantação básica de rodovia (DNIT, 2010), a drenagem de uma rodovia tem como fundamento a função de captação, condução e deságue das águas que atingem o corpo estradal, visando escoá-las de modo rápido e eficiente uma vez que podem comprometer o conforto e a segurança dos usuários e a durabilidade da rodovia. Entre os diversos conteúdos associados ao tema, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) divulgou, por meio da Publicação IPR – 736, denominada “Álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem”, o rol de seus dispositivos de drenagem, sendo esse Manual de caráter orientativo a seus usuários. Nessa perspectiva, esta análise tem como finalidade investigar as condições de projeto aplicadas no âmbito dos dispositivos-tipo de galerias celulares pré-moldadas (aduelas) em comparação a outros possíveis cenários estruturais. Para tanto, a metodologia aqui explanada compreenderá o dimensionamento de quatro modelos estruturais passíveis de adoção como projetos-tipos, diferenciados pela classe de agressividade ambiental, resistência característica à compressão do concreto e coeficientes de impacto adicional e de ponderação incidentes. Em seguida, serão apresentadas as análises comparativas no tocante aos requisitos técnicos a nível de projeto, como relação água/cimento e cobrimento das armaduras, e os impactos na esfera de custos associados a cada modelo, com consequente sugestão de adoção do Modelo D, cenário entendido como de melhor custo-benefício para fins de aplicação como projeto referencial de drenagem de obras rodoviárias.

PALAVRAS-CHAVE: drenagem; aduelas; projetos-tipo.

ABSTRACT: According to the Highway project implementation manual (DNIT, 2010), the highway drainage has the function of capturing, conducting, and draining the water that reaches the road body, aiming to drain it quickly and efficiently, once it can affect the user's comfort and safety, as well as road lifespan. Within the contents associated, the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) releases, through the IPR – 736 Publication, named “Album of standard projects for drainage devices”, the collection of drainage devices of its Autarchy, being this Manual intended to guide its users. In this

perspective, the purpose of this article is to analyze the project conditions applied to the precast box culverts standard projects in comparison to other possible structural scenarios. To this end, the methodology shall include the structural dimension of five simulated models that could be adopted as standard projects, distinguished by the concrete exposure class, feature compression know and concrete coefficients. Then, the comparative analyzes will be presented regarding the technical requirements at the design level, such as water/cement ratio and concrete cover for reinforcement, as well as the impacts related to the costs associated with each model, resulting in the indication of the Model D, scenario understood as the best cost-benefit for application as a reference drainage project for roadworks purpose.

KEYWORDS: *drainage; precast box culverts; standard projects.*

1. INTRODUÇÃO

A drenagem de uma rodovia tem como fundamento a função de captação, condução e deságue das águas que atingem o corpo estradal, visando escoá-las de modo rápido e eficiente uma vez que podem comprometer o conforto e a segurança dos usuários e a durabilidade da rodovia (DNIT, 2010).

No âmbito do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), a Publicação IPR – 736, denominada “Álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem” e cuja versão vigente corresponde à 5ª edição (DNIT, 2018), apresenta o acervo de dispositivos de drenagem com caráter orientativo a seus usuários. Entre as diversas categorias de dispositivos-tipo alcançadas pela referida publicação, tem-se, apresentadas no Capítulo 7, as galerias celulares pré-moldadas em concreto armado, também denominadas aduelas.

Por conceito, os bueiros são obras destinadas a permitir a passagem livre das águas que ocorrem às estradas. De modo geral, são compostos de bocas e corpo, podendo a boca ser substituída por uma caixa coletora, nos casos em que o nível da entrada d'água a montante esteja situado abaixo da superfície do terreno natural (DNIT, 2010).

O corpo do bueiro, segmento de interesse

deste estudo, corresponde à seção longilínea situada sob os cortes e aterro, e pode ser classificado quanto à forma da seção, quanto ao número de linhas, quanto ao material que o constitui e quanto à esconsidade (DNIT, 2010).

Isso posto, este artigo visa apresentar os estudos e avaliações associados aos bueiros classificados como galerias celulares pré-moldadas em concreto armado (aduelas), em linha simples, e sem esconsidade de assentamento, visto que a última não influencia no processo construtivo das células.

2. METODOLOGIA

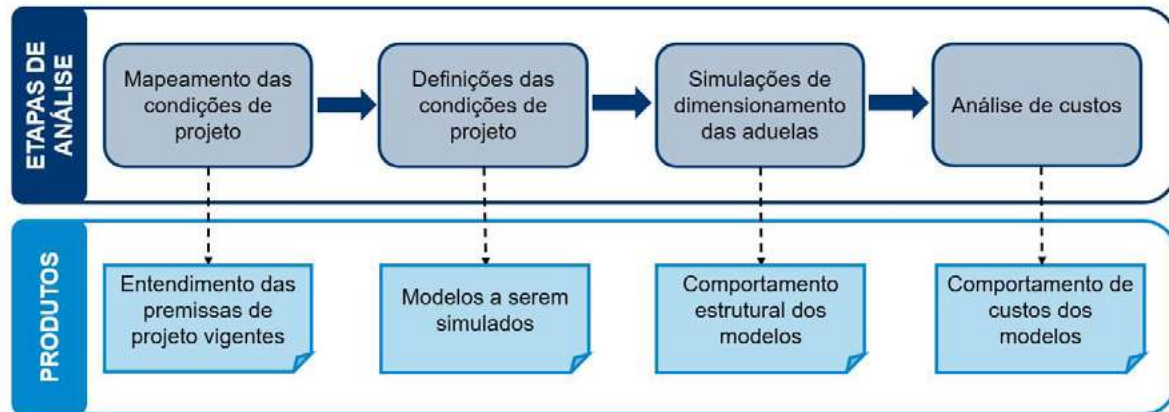
Esta análise comparativa estrutural e de custos tem como finalidade investigar as condições de projeto aplicadas no âmbito dos dispositivos-tipo de galerias celulares pré-moldadas (aduelas) da Publicação IPR – 736 (DNIT, 2018), em específico para obras rodoviárias.

Para isso, a metodologia aplicada compreende o mapeamento das condições de projeto vigentes na 5ª edição do Álbum de projetos-tipo (DNIT, 2018), bem como a definição dos critérios técnicos a serem aplicados nas soluções alternativas a serem estudadas. Em seguida, serão procedidas as simulações para obtenção do dimensionamento estrutural e dos

consumos médios das aduelas a serem empregados na verificação dos critérios técnicos e, posteriormente, econômicos por meio da análise de custos.

A Figura 1 ilustra as etapas do processo de análise e os respectivos produtos derivados de cada uma delas.

Figura 1 - Etapas e produtos do processo de análise comparativa estrutural e de custos das aduelas



Fonte: Elaboração própria

3. ANÁLISE E RESULTADOS

Os itens subsequentes apresentarão, de forma individualizada, as etapas de análise anteriormente elencadas, bem como as discussões e resultados associados a cada uma delas.

3.1 MAPEAMENTO DAS CONDIÇÕES DE PROJETO VIGENTES

Em consulta ao Capítulo 7 da Publicação IPR – 736 (DNIT, 2018), observa-se que os dispositivos-tipo compreendem galerias celulares assentadas em linha simples e dimensionadas, considerando cargas móveis ou acidentais para os esforços solicitantes provenientes do TB-450, ou classe 45, consoante ao preconizado pela norma ABNT NBR 7188 (2013). Para composição da armação das galerias, são previstas telas soldadas em aço CA-60 com reforço de barras de aço CA-50, quando necessárias, com cobrimento nominal equivalente a 4 cm.

Adicionalmente, as alturas de aterro sobre a laje superior das peças consideradas por DNIT (2018), nos dimensionamentos estruturais, são diferenciadas em 7 (sete) tipos, a saber:

- Tipo 1: aterro mínimo de 0,25 m e máximo de 1,00 m;
- Tipo 2: aterro mínimo de 1,00 m e máximo de 2,50 m;
- Tipo 3: aterro mínimo de 2,50 m e máximo de 5,00 m;
- Tipo 4: aterro mínimo de 5,00 m e máximo de 7,50 m;
- Tipo 5: aterro mínimo de 7,50 m e máximo de 10,00 m;
- Tipo 6: aterro mínimo de 10,00 m e máximo de 12,50 m; e
- Tipo 7: aterro mínimo de 12,50 m e máximo de 15,00 m.

Contudo, apesar de a Publicação IPR – 736 (DNIT, 2018) indicar que o Tipo 1 corresponde ao aterro mínimo de 0,25 m e máximo de 1,00 m, o mesmo conteúdo introdutório do Capítulo 7 indica que “Não foi considerada altura de aterro sobre a laje superior das aduelas menor que 0,50 m, já incluindo a espessura do pavimento a executar”. Dessa forma, nesta fase de mapeamento, subentende-se que o aterro Tipo 1 guarde relação com alturas entre 0,50 e 1,00 m.

Quanto às dimensões, tem-se a previsão de células quadradas com 4 (quatro) dimensões internas distintas, nomeadamente 1,50 x 1,50 m, 2,00 x 2,00 m, 2,50 x 2,50 m e 3,00 x 3,00 m (DNIT, 2018).

Em se tratando da resistência característica à

compressão do concreto (f_{ck}), a Publicação IPR – 736 (DNIT, 2018) o adota como variável a depender da altura do aterro e dimensões do dispositivo, ademais a espessura de paredes e lajes varia conjuntamente, conforme elencado nos Quadros 1 e 2.

Quadro 1 - Resistência do concreto das aduelas pré-moldadas da 5ª edição da Publicação IPR – 736

Dimensões do dispositivo (m)	Resistência característica do concreto - f_{ck} (MPa)						
	Aterro Tipo 1	Aterro Tipo 2	Aterro Tipo 3	Aterro Tipo 4	Aterro Tipo 5	Aterro Tipo 6	Aterro Tipo 7
1,50 x 1,50	25			30			35
2,00 x 2,00	25		30		35	40	
2,50 x 2,50	25		30	35	40		
3,00 x 3,00	30			40			

Fonte: DNIT (2018)

Quadro 2 - Espessura de paredes e lajes das aduelas pré-moldadas da 5ª edição da Publicação IPR – 736

Dimensões do dispositivo (m)	Espessura de paredes e lajes (m)						
	Aterro Tipo 1	Aterro Tipo 2	Aterro Tipo 3	Aterro Tipo 4	Aterro Tipo 5	Aterro Tipo 6	Aterro Tipo 7
1,50 x 1,50	0,15				0,20		
2,00 x 2,00	0,15			0,20			0,25
2,50 x 2,50	0,15		0,20			0,25	
3,00 x 3,00	0,15		0,20		0,25		

Fonte: DNIT (2018)

Assim sendo, nesta simulação serão admitidas como referenciais as galerias celulares simples, com dimensões e alturas de aterro conforme parâmetros da 5ª edição da Publicação IPR – 736 (DNIT, 2018).

3.2 DEFINIÇÕES DAS CONDIÇÕES DE PROJETO A SEREM SIMULADAS

Em continuidade, após mapeamento das condições de projeto vigentes, procedeu-se ao estudo do estado da arte das galerias celulares pré-moldadas, com vistas a definir as condições de projeto a serem aplicadas na simulação de redimensionamento.

Segundo a norma ABNT NBR 15396 (2018), intitulada “Aduelas (galerias celulares) de concreto armado pré-moldadas – Requisitos e

métodos de ensaios”, as aduelas devem ser dimensionadas estruturalmente com base nas normas ABNT NBR 6118 (2014), denominada “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento”, e ABNT NBR 9062 (2017), nomeada “Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado”.

A norma ABNT NBR 6118 (2014), que define os procedimentos para elaboração de projetos de estruturas de concreto, expõe que “a durabilidade das estruturas é altamente dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto do cobrimento da armadura”. Por conseguinte, preconiza, por meio das Tabelas 6.1, 7.1 e 7.2, as classes de agressividade ambiental (CAA), a

correspondência entre essas classes e outros fatores, como a qualidade do concreto e o cobrimento nominal das armaduras.

Para fins de aplicação às aduelas, optou-se pela associação das CAA II e III, com agressividades moderada e forte, respectivamente, e que representam risco de deterioração da estrutura pequeno e grande, na mesma ordem (ABNT, 2014). Nessas condições, extraem-se das Tabelas 7.1 e 7.2 da norma ABNT NBR 6118 (2014) as seguintes características iniciais de projeto para as aduelas em concreto armado:

- CAA II: relação água/cimento, em massa, menor ou igual a 0,60, classe do concreto superior ou equivalente a C25 e cobrimento nominal das armaduras de 30 mm; e
- CAA III: relação água/cimento, em massa, menor ou igual a 0,55, classe do concreto superior ou equivalente a C30 e cobrimento nominal das armaduras de 40 mm.

A norma ABNT NBR 6118 (2014) traz ainda, por meio da Tabela 12.1, que os coeficientes de ponderação das resistências no estado-limite último (ELU) do concreto e do aço, para combinações normais, são 1,40 e 1,15, respectivamente.

Já a norma ABNT NBR 9062 (2017), que trata de projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, indica que poderão ser adotados, quando na condição de pré-fabricados, coeficientes de minoração do concreto e aço equivalentes a 1,30 e 1,10, respectivamente. Para pré-moldados, a supracitada norma recomenda a manutenção dos valores preconizados pela ABNT NBR 6118 (2014).

Ainda a respeito da norma ABNT NBR 9062 (2017), essa define pré-moldados como “elemento moldado previamente e fora do local de utilização definitiva na estrutura”, enquanto os

pré-fabricados são entendidos como “elemento pré-moldado executado industrialmente, em instalações permanentes de empresa destinada para este fim”. Assim, infere-se que o controle de qualidade dos elementos pré-fabricados é superior ao dos pré-moldados ou moldados *in loco*.

De modo adicional, a Publicação IPR – 736 (DNIT, 2018) prevê que as aduelas serão pré-moldadas, permitindo assim a aquisição comercial ou a moldagem em canteiro. Isso posto, entende-se como pertinente a aplicação dos coeficientes de minoração para combinações normais preconizados pela norma ABNT NBR 6118 (2014), de 1,40 para o concreto e 1,15 para o aço.

Quanto ao Coeficiente de Impacto Adicional (CIA), a norma ABNT NBR 7188 (2013), que trata de carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas, o define como majoração das cargas móveis na região das juntas estruturais e extremidade da obra, equivalente a 1,25 para obras em concreto ou mistas. A referida norma preconiza ainda que:

Todas as seções dos elementos estruturais a uma distância horizontal, normal à junta, inferior a 5,0 m para cada lado da junta ou descontinuidade estrutural, dever ser dimensionadas com os esforços das cargas móveis majorados pelo coeficiente de impacto adicional (ABNT, 2013).

Em síntese, fundamentado pelas referências normativas supracitadas, obtém-se o rol de 4 (quatro) modelos de análise, sendo o primeiro referente aos projetos-tipos vigentes e os demais correspondentes aos dimensionamentos a serem simulados na análise em questão. As condições de projeto de cada um dos modelos de dimensionamento são:

- Modelo A: projeto estrutural atualmente vigente na 5ª edição da Publicação IPR – 736 (DNIT, 2018), considerando assentamento em linha simples e variação no f_{ck} do concreto a

partir de 25 MPa;

- Modelo B: simulação considerando linha simples, f_{ck} do concreto padronizado em 30 MPa, CAA III, coeficiente de impacto adicional de 1,25 e coeficiente de ponderação do concreto de 1,30;
- Modelo C: simulação considerando linha simples, f_{ck} do concreto padronizado em 25 MPa, CAA II, sem coeficiente de impacto adicional e com coeficiente de ponderação do concreto equivalente a 1,40; e
- Modelo D: simulação considerando linha simples, f_{ck} do concreto padronizado em 30 MPa, CAA III, sem coeficiente de impacto adicional e com coeficiente de ponderação do concreto equivalente a 1,40.

Contudo, cabe mencionar que o *software* próprio da Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto (ABTC), adotado no dimensionamento das aduelas vigentes na 5ª edição da Publicação IPR – 736 (DNIT, 2018), foi submetido a compatibilizações com atualizações normativas e aperfeiçoamentos nos modelos de cálculo, resultando em uma nova versão que será adotada para o dimensionamento dos Modelos B a D. Em virtude dessas atualizações e aperfeiçoamentos, o comparativo desses modelos com o Modelo A pode conter distorções.

Nessa conjuntura, optou-se pela inclusão de um modelo adicional para fins de calibração da análise comparativa, denominado Modelo E, que corresponde ao Modelo A redimensionado a partir do novo *software*.

Em específico sobre o Modelo B, esse prevê a aplicação do coeficiente de impacto adicional equivalente a 1,25 e de ponderação do concreto correspondente a 1,30. Todavia, em análise à norma ABNT NBR 7188 (2013), entende-se que a associação do CIA visa à prevenção de possíveis

impactos das sobrecargas rodoviárias diretamente sobre as estruturas de pontes, situação essa que não ocorre para as aduelas. Portanto, a minoração referente ao coeficiente de impacto adicional é passível de supressão no dimensionamento desses elementos.

Adicionalmente, ainda sobre o Modelo B, entende-se que a aplicação do coeficiente de ponderação do concreto compatível com a condição pré-fabricada (i.e., 1,30) poderia representar restrições de aquisição e utilização das peças uma vez que a Publicação IPR – 736 prevê peças pré-moldadas. Desse modo, apesar de entendido como em desacordo às premissas de dimensionamento e aplicação das aduelas no âmbito dos projetos-tipo da Publicação IPR – 736, o Modelo B será simulado apenas para fins de comparação de custos.

3.3 SIMULAÇÕES DE DIMENSIONAMENTO DAS ADUELAS

Uma vez definidos os 5 (cinco) cenários de simulação, representados por meio dos Modelos A a E, será adotado como espaço amostral de simulação as aduelas unicelulares pré-moldadas com dimensão interna de 2,00 x 2,00 m e altura do aterro dos Tipos 1 a 7.

Além do dimensionamento estrutural, que permite obter os consumos médios de concreto, aço CA-50 e telas soldadas em aço CA-60, procedeu-se também ao cálculo da área de fôrmas para confecção das peças, considerando, para tanto, aplicação nas faces internas e externas das células.

O Quadro 3 apresenta um extrato sintético das especificações das aduelas de 2,00 x 2,00 m simuladas, em específico da espessura de paredes e lajes, dimensões das mísulas e resistência característica à compressão do concreto.

Quadro 3 – Especificações dos modelos simulados

Modelo	Tipo	Aterro Altura do aterro (m)	Espessura de paredes e lajes (m)	Mísulas (m)	f_{ck} (MPa)
Modelo A	Tipo 1	0,50 a 1,00	0,15	0,20	25
	Tipo 2	1,00 a 2,50	0,15	0,20	25
	Tipo 3	2,50 a 5,00	0,15	0,20	30
	Tipo 4	5,00 a 7,50	0,20	0,20	30
	Tipo 5	7,50 a 10,00	0,20	0,20	35
	Tipo 6	10,00 a 12,50	0,20	0,20	40
	Tipo 7	12,50 a 15,00	0,25	0,20	40
Modelo B	Tipo 1	0,50 a 1,00	0,15	0,20	30
	Tipo 2	1,00 a 2,50	0,15	0,20	30
	Tipo 3	2,50 a 5,00	0,15	0,20	30
	Tipo 4	5,00 a 7,50	0,20	0,20	30
	Tipo 5	7,50 a 10,00	0,20	0,20	30
	Tipo 6	10,00 a 12,50	0,20	0,20	30
	Tipo 7	12,50 a 15,00	0,25	0,20	30
Modelo C	Tipo 1	0,50 a 1,00	0,15	0,20	25
	Tipo 2	1,00 a 2,50	0,15	0,20	25
	Tipo 3	2,50 a 5,00	0,15	0,20	25
	Tipo 4	5,00 a 7,50	0,20	0,20	25
	Tipo 5	7,50 a 10,00	0,20	0,20	25
	Tipo 6	10,00 a 12,50	0,25	0,20	25
	Tipo 7	12,50 a 15,00	0,25	0,20	25
Modelo D	Tipo 1	0,50 a 1,00	0,15	0,20	30
	Tipo 2	1,00 a 2,50	0,15	0,20	30
	Tipo 3	2,50 a 5,00	0,15	0,20	30
	Tipo 4	5,00 a 7,50	0,20	0,20	30
	Tipo 5	7,50 a 10,00	0,20	0,20	30
	Tipo 6	10,00 a 12,50	0,25	0,20	30
	Tipo 7	12,50 a 15,00	0,25	0,20	30
Modelo E	Tipo 1	0,50 a 1,00	0,15	0,20	25
	Tipo 2	1,00 a 2,50	0,15	0,20	25
	Tipo 3	2,50 a 5,00	0,15	0,20	30
	Tipo 4	5,00 a 7,50	0,20	0,20	30
	Tipo 5	7,50 a 10,00	0,20	0,20	35
	Tipo 6	10,00 a 12,50	0,20	0,20	40
	Tipo 7	12,50 a 15,00	0,25	0,20	40

Fonte: Elaboração própria

Aplicando as especificações do Quadro 3 na de tela soldada em aço CA-60 e de fôrmas
simulação estrutural dos Modelos A a E, obtêm-se elencados no Quadro 4.
os consumos médios de concreto, de aço CA-50,

Quadro 4 - Consumos médios dos modelos simulados

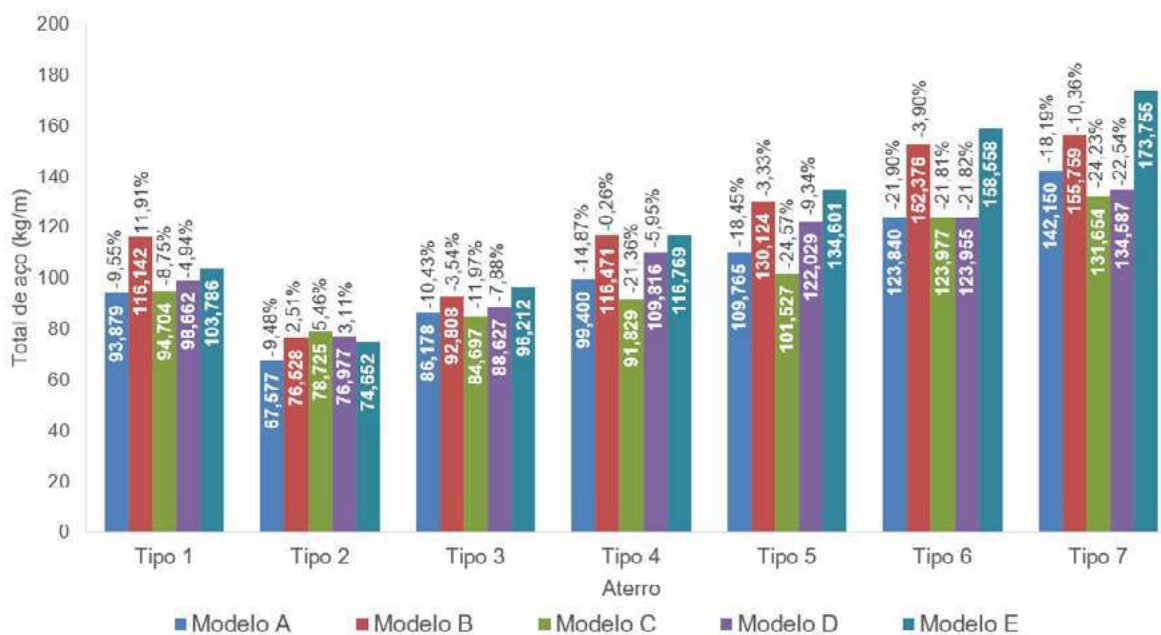
Modelo	Tipo	Aterro Altura do aterro (m)	Concreto (m³/m)	Aço CA-50 (kg/m)	Aço CA-60 (kg/m)	Fôrmas (m²/m)
Modelo A	Tipo 1	0,50 a 1,00	1,37	33,049	60,830	16,7314
	Tipo 2	1,00 a 2,50	1,37	6,747	60,830	16,7314
	Tipo 3	2,50 a 5,00	1,37	25,348	60,830	16,7314
	Tipo 4	5,00 a 7,50	1,84	36,113	63,287	17,1314
	Tipo 5	7,50 a 10,00	1,84	46,478	63,287	17,1314
	Tipo 6	10,00 a 12,50	1,84	60,553	63,287	17,1314
	Tipo 7	12,50 a 15,00	2,33	76,655	65,495	17,5314
Modelo B	Tipo 1	0,50 a 1,00	1,37	54,760	61,382	16,7314
	Tipo 2	1,00 a 2,50	1,37	15,146	61,382	16,7314
	Tipo 3	2,50 a 5,00	1,37	31,426	61,382	16,7314
	Tipo 4	5,00 a 7,50	1,84	52,881	63,590	17,1314
	Tipo 5	7,50 a 10,00	1,84	66,534	63,590	17,1314
	Tipo 6	10,00 a 12,50	1,84	88,786	63,590	17,1314
	Tipo 7	12,50 a 15,00	2,33	89,961	65,798	17,5314
Modelo C	Tipo 1	0,50 a 1,00	1,37	31,873	62,831	16,7314
	Tipo 2	1,00 a 2,50	1,37	15,894	62,831	16,7314
	Tipo 3	2,50 a 5,00	1,37	21,866	62,831	16,7314
	Tipo 4	5,00 a 7,50	1,84	26,742	65,087	17,1314
	Tipo 5	7,50 a 10,00	1,84	36,440	65,087	17,1314
	Tipo 6	10,00 a 12,50	2,33	56,634	67,343	17,5314
	Tipo 7	12,50 a 15,00	2,33	64,311	67,343	17,5314
Modelo D	Tipo 1	0,50 a 1,00	1,37	37,281	61,381	16,7314
	Tipo 2	1,00 a 2,50	1,37	15,596	61,381	16,7314
	Tipo 3	2,50 a 5,00	1,37	27,246	61,381	16,7314
	Tipo 4	5,00 a 7,50	1,84	46,227	63,589	17,1314
	Tipo 5	7,50 a 10,00	1,84	58,440	63,589	17,1314
	Tipo 6	10,00 a 12,50	2,33	58,158	65,797	17,5314
	Tipo 7	12,50 a 15,00	2,33	68,790	65,797	17,5314
Modelo E	Tipo 1	0,50 a 1,00	1,37	42,404	61,382	16,7314
	Tipo 2	1,00 a 2,50	1,37	13,27	61,382	16,7314
	Tipo 3	2,50 a 5,00	1,37	34,83	61,382	16,7314
	Tipo 4	5,00 a 7,50	1,84	53,18	63,589	17,1314
	Tipo 5	7,50 a 10,00	1,84	71,012	63,589	17,1314
	Tipo 6	10,00 a 12,50	1,84	93,273	65,285	17,1314
	Tipo 7	12,50 a 15,00	2,33	107,958	65,797	17,5314

Fonte: Elaboração própria

Cabe mencionar que os consumos médios expressos por meio do Quadro 4 correspondem aos quantitativos efetivos de materiais dimensionados a partir da geometria das peças e do dimensionamento estrutural, sem adição de taxas de perda ou reaproveitamento.

A Figura 2 demonstra o comportamento do total de aço para os cenários simulados, bem como apresenta as porcentagens de variação entre o consumo de cada modelo em comparação ao consumo de referência do Modelo E.

Figura 2 - Comparativo do consumo total de aço com base no Modelo E



Fonte: Elaboração própria

Quanto ao volume de concreto e área de fôrmas, apenas os Modelos C e D associados ao aterro tipo 6 apresentaram variação em comparação ao Modelo E, motivado pela alteração da espessura das paredes e lajes, de 20 para 25 cm. Tais variações representam, em ambos os casos, um acréscimo de concreto equivalente a 26,63 % e de fôrmas correspondente a 2,33 %. Quanto aos demais cenários, esses não apresentaram variações entre os modelos simulados.

3.4 ANÁLISE DE CUSTOS

Em continuidade, com base nas especificações dos modelos simulados elencadas no Quadro 3 e nos consumos médios do Quadro 4, procedeu-se à simulação de custos com vistas

a comparar o comportamento dos modelos em debate.

Para tanto, foram adotados os valores de referência divulgados por meio do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), para o mês-base de julho de 2022 e com referência no estado de São Paulo (DNIT, 2022). Em adição, para concepção da simulação, as seguintes condições de contorno foram admitidas:

- Quando pertinente, os custos unitários preveem uso de areia e brita comerciais;
- Os custos unitários de execução (i.e., equipe mecânica e mão de obra) foram calculados com base nas parcelas horárias das composições de custos SICRO associadas; e
- As despesas indiretas foram

desconsideradas, pois são assumidas como equivalentes em todas as condições simuladas.

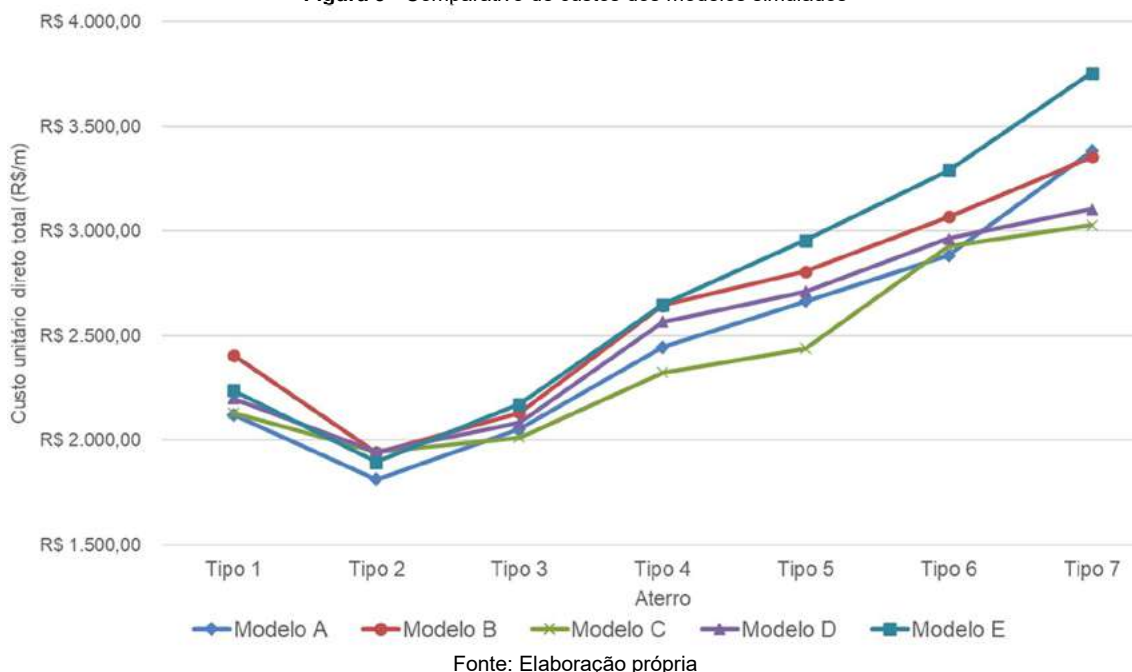
O Quadro 5 apresenta os custos unitários diretos totais e as variações com relação aos

custos do Modelo E, assumido como modelo de calibração da análise comparativa, enquanto a Figura 3 exibe o gráfico comparativo.

Quadro 5 - Comparativo de custos dos modelos simulados

Modelo	Tipo	Aterro Altura do aterro (m)	Custo unitário direto total (R\$/m)	Variação com Modelo E	
				(R\$/m)	(%)
Modelo A	Tipo 1	0,50 a 1,00	R\$ 2.122,01	-R\$ 116,39	-5,20 %
	Tipo 2	1,00 a 2,50	R\$ 1.812,54	-R\$ 83,06	-4,38 %
	Tipo 3	2,50 a 5,00	R\$ 2.054,61	-R\$ 117,88	-5,43 %
	Tipo 4	5,00 a 7,50	R\$ 2.445,22	-R\$ 204,32	-7,71 %
	Tipo 5	7,50 a 10,00	R\$ 2.664,51	-R\$ 292,20	-9,88 %
	Tipo 6	10,00 a 12,50	R\$ 2.882,89	-R\$ 407,85	-12,39 %
	Tipo 7	12,50 a 15,00	R\$ 3.383,09	-R\$ 371,87	-9,90 %
Modelo B	Tipo 1	0,50 a 1,00	R\$ 2.407,03	R\$ 168,62	7,53 %
	Tipo 2	1,00 a 2,50	R\$ 1.940,87	R\$ 45,27	2,39 %
	Tipo 3	2,50 a 5,00	R\$ 2.132,43	-R\$ 40,07	-1,84 %
	Tipo 4	5,00 a 7,50	R\$ 2.646,02	-R\$ 3,51	-0,13 %
	Tipo 5	7,50 a 10,00	R\$ 2.806,68	-R\$ 150,03	-5,07 %
	Tipo 6	10,00 a 12,50	R\$ 3.068,55	-R\$ 222,19	-6,75 %
	Tipo 7	12,50 a 15,00	R\$ 3.353,09	-R\$ 401,87	-10,70 %
Modelo C	Tipo 1	0,50 a 1,00	R\$ 2.130,94	-R\$ 107,46	-4,80 %
	Tipo 2	1,00 a 2,50	R\$ 1.942,97	R\$ 47,37	2,50 %
	Tipo 3	2,50 a 5,00	R\$ 2.013,20	-R\$ 159,29	-7,33 %
	Tipo 4	5,00 a 7,50	R\$ 2.324,25	-R\$ 325,28	-12,28 %
	Tipo 5	7,50 a 10,00	R\$ 2.438,36	-R\$ 518,35	-17,53 %
	Tipo 6	10,00 a 12,50	R\$ 2.925,53	-R\$ 365,21	-11,10 %
	Tipo 7	12,50 a 15,00	R\$ 3.029,32	-R\$ 725,64	-19,32 %
Modelo D	Tipo 1	0,50 a 1,00	R\$ 2.201,29	-R\$ 37,11	-1,66 %
	Tipo 2	1,00 a 2,50	R\$ 1.946,16	R\$ 50,56	2,67 %
	Tipo 3	2,50 a 5,00	R\$ 2.083,22	-R\$ 89,28	-4,11 %
	Tipo 4	5,00 a 7,50	R\$ 2.567,70	-R\$ 81,84	-3,09 %
	Tipo 5	7,50 a 10,00	R\$ 2.711,41	-R\$ 245,31	-8,30 %
	Tipo 6	10,00 a 12,50	R\$ 2.965,32	-R\$ 325,42	-9,89 %
	Tipo 7	12,50 a 15,00	R\$ 3.103,90	-R\$ 651,07	-17,34 %
Modelo E	Tipo 1	0,50 a 1,00	R\$ 2.238,40	-	-
	Tipo 2	1,00 a 2,50	R\$ 1.895,60	-	-
	Tipo 3	2,50 a 5,00	R\$ 2.172,49	-	-
	Tipo 4	5,00 a 7,50	R\$ 2.649,53	-	-
	Tipo 5	7,50 a 10,00	R\$ 2.956,71	-	-
	Tipo 6	10,00 a 12,50	R\$ 3.290,74	-	-
	Tipo 7	12,50 a 15,00	R\$ 3.754,96	-	-

Fonte: Elaboração própria

Figura 3 - Comparativo de custos dos modelos simulados

Analisando os valores mínimos e máximos destacados no Quadro 5 para cada modelo em conjunto com o comportamento das curvas da Figura 3, é possível observar que grande parte das amostras apresentam custos simulados inferiores aos do Modelo E, salvo a condição de aterro 1 para o Modelo B e aterro 2 para os Modelos B, C e D.

Quanto ao Modelo B, conforme dito anteriormente, esse foi simulado apenas para fins de comparação de custos e será desconsiderado, visto que aplica o coeficiente de impacto adicional de 1,25 e coeficiente de ponderação do concreto de 1,30. Tais valores não são entendidos como recomendáveis para o dimensionamento das aduelas, o que redundaria na possibilidade de adoção dos Modelos C ou D.

No âmbito dos Modelos C e D, ambos demonstram faixas de custos na mesma proporção, com custo unitário direto total mínimo e máximo equivalentes a R\$ 1.942,97 e R\$ 3.029,23 para o Modelo C e R\$ 1.946,16 e R\$ 3.103,90 para o Modelo D, os quais representam variações em comparação ao Modelo E entre -

19,32 % e 2,50 % para o primeiro e entre -17,34 % e 2,67 % para o segundo.

Para aplicação como condição-tipo de dimensionamento, contudo, é desejável a adoção da CAA III (i.e., Modelo D), motivado principalmente pela maior durabilidade das peças, além de menor restrição de aplicação com relação à agressividade do meio.

Sobre esse tema de durabilidade das estruturas de concreto, de acordo com Medeiros, Andrade e Helene (2011):

Uma diretriz geral, encontrada na literatura técnica, ressalta que a durabilidade da estrutura de concreto é determinada por quatro fatores identificados como regra dos 4C:

- Composição ou traço do concreto;
- Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
- Cura efetiva do concreto na estrutura;
- Cobrimento das armaduras.

Nesse aspecto, considerando os 2 (dois) modelos passíveis de adoção como condição-tipo para dimensionamento das aduelas da Publicação IPR – 736, os modelos C e D se diferenciam, a nível de projeto, na composição do concreto: relação água/cimento e cobrimento das armaduras.

Ressalta-se que, comparando os Modelos C e D com base nos critérios de relação água/cimento, resistência mínima do concreto e cobrimento nominal das armaduras preconizados pela norma ABNT NBR 6118 (2014), o Modelo D, com CAA III, adota parâmetros mais rígidos em relação ao Modelo C, com CAA II.

Desse modo, com base nesses parâmetros normativos, entende-se que o Modelo D, com composição do concreto com base nos critérios de CAA III, ou seja, maior resistência característica do concreto, maior espessura de cobrimento das armaduras e relação água/cimento menor ou igual a 0,55 em massa, tende a favorecer a durabilidade da estrutura de acordo com a regra dos 4C, o que implica em redução de custos com a manutenção desses dispositivos.

4. CONCLUSÃO

Esta análise comparativa foi elaborada com vistas a investigar as condições de projeto aplicadas no âmbito dos projetos-tipo de galerias celulares pré-moldadas (aduelas) da Publicação IPR – 736 (DNIT, 2018). Para tanto, foram realizadas análises comparativas no tocante aos requisitos técnicos a nível de projeto e os respectivos impactos de custos associados a cada modelo, redundando na sugestão de adoção do Modelo D como referencial.

Como resultado deste estudo, entende-se que o Modelo A, que representa os projetos atualmente vigentes na 5ª edição da Publicação IPR – 736 (DNIT, 2018), carece de revisão, de modo a incorporar atualizações normativas e aperfeiçoamentos nos modelos de cálculo. Desse modo, no contexto desta análise, o modelo denominado como referencial passa a corresponder ao Modelo E, ou seja, aquele redimensionado a partir dos critérios normativos vigentes.

O Modelo B, por sua vez, apesar de tecnicamente compatível aos parâmetros normativos, aplica coeficientes de impacto adicional e de ponderação do concreto cujas características de projeto se mostram distintas daquelas de interesse para aplicação aos projetos-tipo de aduelas no contexto da Publicação IPR – 736. Dessa forma, tal modelo foi simulado apenas para fins de comparação de custos.

No âmbito financeiro, é possível constatar que os Modelos C e D demonstraram comportamento economicamente mais vantajoso em relação ao Modelo E, uma vez que a simulação demonstrou redução de custos para as faixas de aterro tipos 1, 3, 4, 5, 6 e 7, com média equivalente a -12,06 % e -7,40 %, respectivamente. Exclusivamente para a faixa de aterro tipo 2, a simulação indicou aumento de custos para ambos os Modelos, contudo de pequena magnitude, representando 2,50 % para o Modelo C e 2,67 % para o Modelo D.

Ainda sobre os custos, entende-se que os Modelos C e D exibiram comportamento similar, em que o custo unitário direto total mínimo e máximo equivalem a R\$ 1.942,97 e R\$ 3.029,23 para o Modelo C e R\$ 1.946,16 e R\$ 3.103,90 para o Modelo D.

No escopo dos parâmetros correlatos à relação água/cimento e cobrimento das armaduras, ambos os Modelos C e D se mostram passíveis de aplicação no tocante a esses requisitos técnicos.

Contudo, conforme descrito, a composição do concreto com base nos critérios de CAA III tende a favorecer a durabilidade da estrutura de acordo com a regra dos 4C, o que denota ao Modelo D vantagens nesse aspecto, bem como representa menor restrição de aplicação com relação à agressividade do meio.

Face ao exposto, como reflexo desta análise comparativa, e de modo a incorporar atualizações normativas e práticas executivas de engenharia, sugere-se que a Publicação IPR – 736 incorpore os critérios de dimensionamento do Modelo D, uma vez que os resultados das simulações levam a concluir que esse Modelo retrata as condições de projeto técnica e economicamente preferíveis para adoção como referenciais no âmbito das aduelas destinadas a obras rodoviárias.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6118:2014: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7188:2013: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas - Requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9062:2017: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15396:2018: Aduelas (galerias celulares) de concreto armado pré-moldadas – Requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Publicação IPR 742: Manual de implantação básica de rodovia**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Publicação IPR – 736: Álbum de projetos-tipo de dispositivos de drenagem**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: IPR, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Sistema de custos referenciais de obras - SICRO**. São Paulo. Ref. julho/2022. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro/sudeste/sudeste>. Acesso em: 15 mar. 2023.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. 2011. Concreto: Ciência e tecnologia. IBRACON. Capítulo 22. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc55.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2023.

UM PANORAMA DA CRIAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA NACIONAL DE RECUPERAÇÃO, OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO E GERENCIAMENTO DE ECLUSAS (PROECLUSAS), NO BRASIL

AN OVERVIEW OF THE CREATION AND IMPLEMENTATION OF THE NATIONAL PROGRAM FOR THE RECOVERY, OPERATION, MAINTENANCE, AND MANAGEMENT OF LOCKS (PROECLUSAS) IN BRAZIL

Iviane Cunha Santos - iviane.santos@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0000-0001-8572-0987>

Gleilson Mendes Nunes - gleilson.nunes@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0006-1420-0099>

Augusto Ayub - augusto.ayub@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0007-8272-8634>

David Wilkerson Bessa da Luz - david.bessa@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0007-1091-6118> RESUMO

RESUMO: O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é responsável pelo projeto, construção, operação e manutenção de hidrovias federais no Brasil, incluindo infraestrutura de eclusas e barragens nessas hidrovias. Atualmente, o DNIT é responsável pela operação e manutenção de oito eclusas existentes em hidrovias federais. Para garantir a operação sustentada das eclusas de navegação existentes, o DNIT estabeleceu um programa de avaliação e inspeção de ativos, chamado PROECLUSAS. Esse programa pretende implementar a necessária estruturação e administração desse segmento de infraestrutura de transportes, dentro do período de 2019 a 2026. Para atingir esse objetivo, o Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE) e o DNIT, em um acordo de parceria intergovernamental, realizaram inspeção em uma das eclusas e, posteriormente, realizaram recomendações que o DNIT desenvolverá no futuro. A proposta se concentrou especificamente nos aspectos operacionais e de manutenção dos diversos sistemas da instalação de eclusas e barragens: sistemas hidráulicos, elétricos, mecânicos, estruturais e outros. O objetivo geral deste artigo é desenvolver uma visão integrada dos diversos aspectos técnicos e administrativos envolvidos na operação, manutenção e gestão do Programa de Eclusas PROECLUSA, que se configurou como um Programa Nacional de Recuperação, Operação, Manutenção e Gerenciamento de Eclusas.

PALAVRAS-CHAVE: eclusas; gerenciamento; construção; operação e manutenção.

ABSTRACT: *The National Department of Transportation Infrastructure (DNIT) is entrusted with the planning, construction, operation, and maintenance of federal waterways in Brazil, which includes lock and dam infrastructure on these waterways. Presently, DNIT assumes responsibility for the operation and maintenance of eight existing locks on federal waterways. To ensure the sustained operation of the existing navigation locks, DNIT has established an asset assessment and inspection program named PROECLUSAS. This program aims to implement the necessary structuring and management of this transportation infrastructure segment from 2019 to 2026. To achieve this objective, the United States Army Corps of Engineers (USACE) and DNIT conducted an inspection of one of the locks through an*

Intergovernmental Partnership Agreement, subsequently providing recommendations that DNIT will develop in the future. The proposal was focused specifically on the operational and maintenance aspects of the various systems in the lock and dam facility, encompassing hydraulic, electrical, mechanical, structural, and other systems. The overall goal of this article is to develop an integrated perspective on the various technical and administrative aspects involved in the operation, maintenance, and management of the PROECLUSAS Lock Program, which has been configured as a National Program for the Recovery, Operation, Maintenance, and Management of Locks.

KEYWORDS: locks; management; construction; operation and maintenance.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil vem investindo em programas e ações que visam dotar o extenso potencial hidrográfico do país com a competitividade necessária e aumentar a participação do modal hidroviário na matriz nacional de transportes. Com isso, busca-se garantir a operação perene dos cursos d'água e, assim, dotá-los da infraestrutura necessária, principalmente no que diz respeito às eclusas.

A Diretoria de Infraestrutura Aquaviária (DAQ) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é responsável por administrar e gerenciar a execução da operação, manutenção e restauração da infraestrutura hidroviária, conforme estabelecido pela Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001 (Brasil, 2001).

Desde 2019, a DAQ vem estruturando e implementando o Programa de Manutenção Aquaviária (PMA) com o objetivo de gerenciar contratos atuais e futuros relacionados à manutenção da infraestrutura de transporte aquaviário, integrando ações individuais aos diversos programas que compõem o plano. O PMA é composto por cinco planos e programas: Plano de Monitoramento Aquaviário (PMH), Plano Anual de Dragagem de Manutenção Aquaviária (PADMA), Programa Nacional de Sinalização Aquaviária (PROSINAQUA), Programa de Eclusas (PROECLUSAS) e Programa IP4 (PROIP4).

O PROECLUSAS foi desenvolvido para a recuperação, operação, manutenção e gerenciamento de estruturas de eclusas e barragens de navegação com foco na implementação de melhorias estruturais e de governança necessárias a esse segmento de infraestrutura de transportes.

O objetivo do Programa é implementar melhorias estruturais e de administração necessárias para a infraestrutura de transporte de navegação interior associada a eclusas e barragens de 2019 a 2026. As atividades representativas do Programa PROECLUSAS incluem o desenvolvimento de contratos eficientes de Operação e Manutenção (O&M), recuperação e modernização de sistemas, organização de acervos de documentos técnicos e elaboração de normas culturais e ambientais.

As atividades específicas do PROECLUSAS são o desenvolvimento de contratos de Operação e Manutenção (O&M), recuperação e/ou modernização de sistemas de eclusas e barragens, organização de acervos de documentos técnicos e regularização ambiental/cultural. O PROECLUSAS faz parte de uma prioridade nacional mais ampla para desenvolver e expandir a navegação interior para apoiar o desenvolvimento de oportunidades econômicas sustentáveis. O processo é norteado pela Política Nacional de Transporte Aquaviário e pelo Plano Estratégico Aquaviário.

Este artigo apresenta recomendações para subsidiar novas melhorias no Programa PROECLUSAS e estabelecer diretrizes gerais para a promoção da navegação interior no Brasil, com foco no apoio aos usos múltiplos das hidrovias e ao planejamento integrado dos recursos hídricos.

2 HISTÓRIA

As eclusas são estruturas fundamentais para a operação de sistemas de navegação em rios e canais, permitindo que as embarcações superem diferenças de níveis entre diferentes trechos do curso d'água. A história das eclusas remonta a pelo menos 900 A.C., quando a Dinastia Song construiu um sistema de rampas para atravessar rios na China (Needham, 1971).

No entanto, o uso sistemático de eclusas para navegação só começou a se tornar comum na Europa na Idade Média. Uma das primeiras eclusas conhecidas foi construída em 1373 no rio Mosa, na Holanda (Needham, 1971). A partir daí, as eclusas se espalharam por toda a Europa, sendo utilizadas principalmente para o transporte de mercadorias como madeira, carvão e grãos.

No século 19, com a Revolução Industrial, as eclusas se tornaram ainda mais importantes, permitindo a navegação em rios antes considerados intransitáveis. Na América do Norte, as eclusas também desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento de sistemas de navegação, permitindo a conexão entre os Grandes Lagos e o Oceano Atlântico através do Rio São Lourenço (Nix, 2014).

Com o passar dos anos, as eclusas se tornaram cada vez mais sofisticadas e eficientes. Atualmente, as eclusas são construídas com tecnologia avançada, com sistemas de controle remoto, sensores de pressão e computadores para otimizar o fluxo de água e garantir a segurança das embarcações.

As eclusas também desempenharam um papel importante no desenvolvimento da energia hidrelétrica. A energia cinética gerada pela queda de água pelas eclusas pode ser captada e utilizada para gerar energia elétrica, tornando as eclusas uma fonte de energia limpa e renovável.

A primeira eclusa construída no Brasil foi no rio Caí, localizado no rio de mesmo nome, no Rio Grande do Sul (IPEA, 2014). A eclusa foi inaugurada em 1906 e permitiu a navegação fluvial de São Sebastião do Caí até Porto Alegre. No entanto, foi com a construção da Hidrovia Tietê-Paraná que o uso de eclusas se intensificou no Brasil.

A hidrovia liga o interior do país ao porto de Santos, no litoral de São Paulo, pelos rios Tietê, Paraná e Grande. Várias eclusas foram construídas ao longo da hidrovia, como Nova Avanhandava, Jupiá e Três Irmãos, permitindo a navegação de embarcações de grande porte.

Além da hidrovia Tietê-Paraná, outras hidrovias importantes do Brasil também possuem eclusas, como a Hidrovia São Francisco, que tem a Eclusa de Sobradinho, e a Hidrovia Tocantins-Araguaia, que tem a Eclusa de Tucuruí.

As eclusas são importantes para a economia brasileira, pois permitem o transporte de cargas de forma mais barata e eficiente, reduzindo custos logísticos e a emissão de gases poluentes. Além disso, permitem que as embarcações acessem áreas que, de outra forma, seriam inacessíveis, o que incentiva o desenvolvimento regional.

Em resumo, as eclusas são parte importante da história da navegação e da engenharia hidráulica. Desde seus primeiros usos na China antiga até as eclusas modernas de hoje, têm sido fundamentais para a economia e a infraestrutura de muitos países ao redor do mundo.

3 VISÃO GERAL DO SISTEMA

O Brasil possui uma vasta rede hidroviária,

com aproximadamente 99.000 km de extensão, dos quais, hoje, cerca de 19.000 km são considerados economicamente navegáveis e priorizados do ponto de vista da infraestrutura de transporte aquaviário.

Essa malha densa é formada tanto por rios de planície quanto por rios de planalto, esse último caracterizado pela existência de obstáculos naturais à navegação, como reentrâncias rochosas e baixas profundidades. Nos rios com obstáculos naturais, para que os esses sejam superados, se faz necessária a realização de intervenções de engenharia hidráulica, como a construção de eclusas, barragens e/ou deslizamentos.

Especificadamente, as eclusas são obras de engenharia que permitem que as embarcações superem desníveis nos cursos d'água, ou seja, que subam ou desçam rios ou mares, em locais

onde há desníveis. Geralmente são construídos sobre barragens, cachoeiras, corredeiras ou usinas hidrelétricas, conforme conceituado no Glossário Aquaviário do DNIT (DNIT, 2023), trata-se de obras de infraestrutura de grande porte que requerem investimentos financeiros substanciais, exigindo manutenção adequada e constante de seus sistemas e equipamentos, bem como uma gestão eficaz de sua operação e administração.

3.1 BREVE DESCRIÇÃO DA FUNCIONALIDADE DAS ECLUSAS

As eclusas funcionam como elevadores para embarcações, separando os dois níveis do curso d'água. Seu funcionamento pode ser brevemente descrito da seguinte forma:

- **Fase 1:** Para superar a diferença de nível, de jusante (parte baixa) para montante (parte superior), a embarcação entra pela porta a jusante da eclusa (Figura 1).

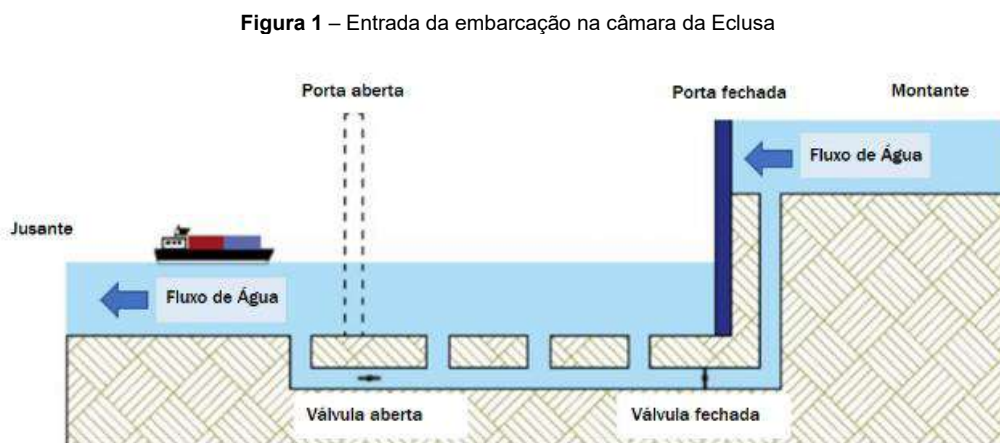
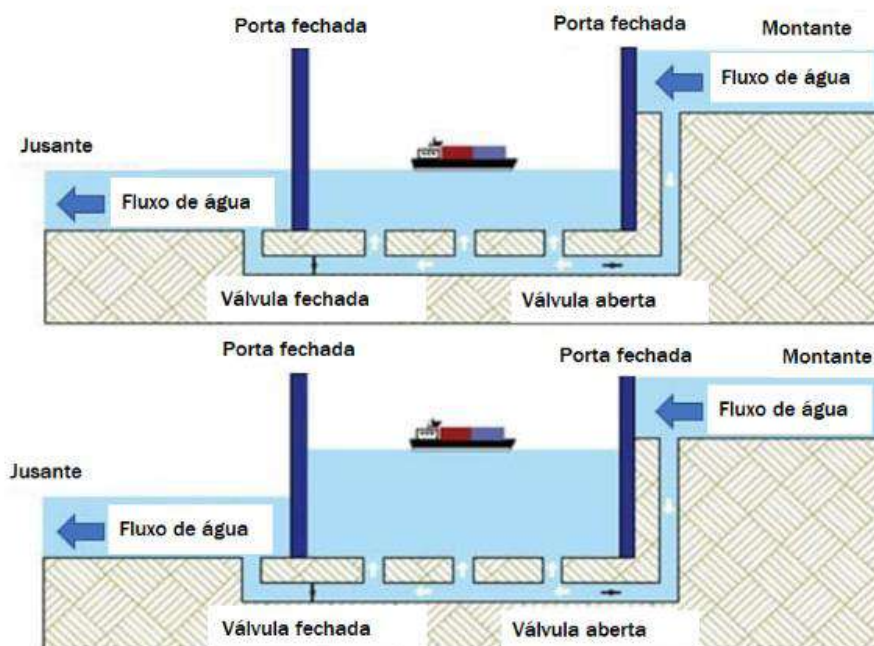


Figura 1 – Entrada da embarcação na câmara da Eclusa

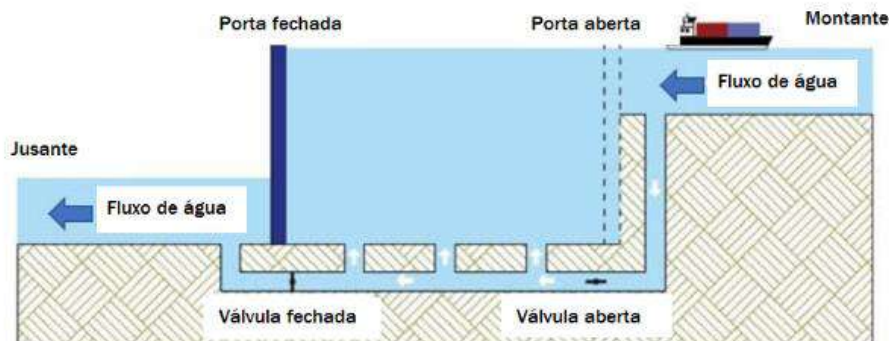
Fonte: Acervo da DAQ/DNIT.

- **Fase 2:** Uma vez dentro da câmara, a porta e a comporta a jusante são fechadas e a comporta a montante é aberta, permitindo que a câmara declusagem comece a encher e elevar a embarcação até o ponto de equalização com o nível de água a montante (Figura 2).

Figura 2 – Processo de enchimento da câmara de eclusagem

Fonte: Acervo da DAQ/DNIT.

- **Fase 3:** Em seguida, os níveis são equalizados, a porta a montante é aberta e a embarcação segue seu curso normal (Figura 3).

Figura 3 – Conclusão do processo de eclusagem

Fonte: Acervo da DAQ/DNIT.

3.2 ECLUSAS E BARRAGENS SOB RESPONSABILIDADE DO DNIT

O sistema de Eclusas e Barragens sob responsabilidade do DNIT é composto por oito instalações de eclusas (Figura 4). A Figura 5 apresenta a estrutura e visão geral de cada uma das eclusas juntamente com o nome dos rios. Quatro eclusas estão no Rio Grande do Sul, sendo elas: Bom Retiro do Sul, Amarópolis, Anel de Dom Marco e Fandango.

Outras eclusas estão no Estado de São Paulo (Jupia, Três Irmãos), Estado do Pará (Tucuruí) e Estado da Bahia (Sobradinho). As quatro eclusas e barragens no Rio Grande do Sul estão na região de Porto Alegre, com a Eclusa e Barragem do Bom Retiro do Sul localizadas no Rio Taquari e as eclusas e barragens de Amarópolis, Anel de Dom Marco e Fandango no Rio Jacuí. A Tabela 1 resume a lista de eclusas sob a responsabilidade do DNIT.

As Eclusas e Barragens de Jupia e Três Irmãos, no Estado de São Paulo, estão localizadas próximas à divisa com o Estado do Mato Grosso do Sul e estão nos rios Paraná e Tietê, respectivamente. A Eclusa de Tucuruí está localizada no rio Tocantins dentro da bacia hidrográfica amazônica e a eclusa de Sobradinho está localizada no rio São Francisco.

Figura 4 – Mapa do Brasil indicando a localização das eclusas e barragens do DNIT



Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

Figura 5 – Imagens das oito eclusas do DNIT e os rios em que estão situadas



Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

Tabela 1 – Eclusas de responsabilidade do DNIT

ECLUSA	RIO	ESTADO
ANEL DE DOM MARCO	JACUÍ	RS
AMARÓPOLIS	JACUÍ	RS
BOM RETIRO DO SUL	TAQUARI	RS
FANDANGO	JACUÍ	RS
JUPIÁ	PARANÁ	MS
TRÊS IRMÃOS	TIETÊ	SP
TUCURUÍ	TOCANTINS	PA
SOBRADINHO	SÃO FRANCISCO	BA

Fonte: Elaboração própria

3.3 INFORMAÇÕES TÉCNICAS SOBRE AS ECLUSAS E BARRAGENS SOB RESPONSABILIDADE DO DNIT

A eclusa e barragem de Amarópolis (Figura 6) fica localizada no rio Jacuí, HN-706, município de General Câmara, RS. O sistema teve seu comissionamento concluído em 1974, encontrando-se atualmente em operação sob a responsabilidade da Superintendência Regional do DNIT no Estado do Rio Grande do Sul – SR/RS.

Características técnicas:

- Tipologia: Barragem tipo móvel com 2 etapas

de regulação de descarga;

- Alças: 84 alças acionadas por 2 carros de manobra instalados na estrutura metálica;
- Câmara (m): 17,00 x 120,00 x 2,50 (Largura x Comprimento x Profundidade);
- Diferença de nível (m): 5,00;
- Porta a Montante: Tipo Esquadria (duas folhas) 4,10 x 9,00 m (Altura x Largura);
- Porta a Jusante: Tipo Esquadria (duas folhas) 9,10 x 9,00 m (Altura x Largura);
- Lat.: -29.94694444;
- Long.: -51.89527778.

Figura 6 – Eclusa e Barragem de Amarópolis



Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

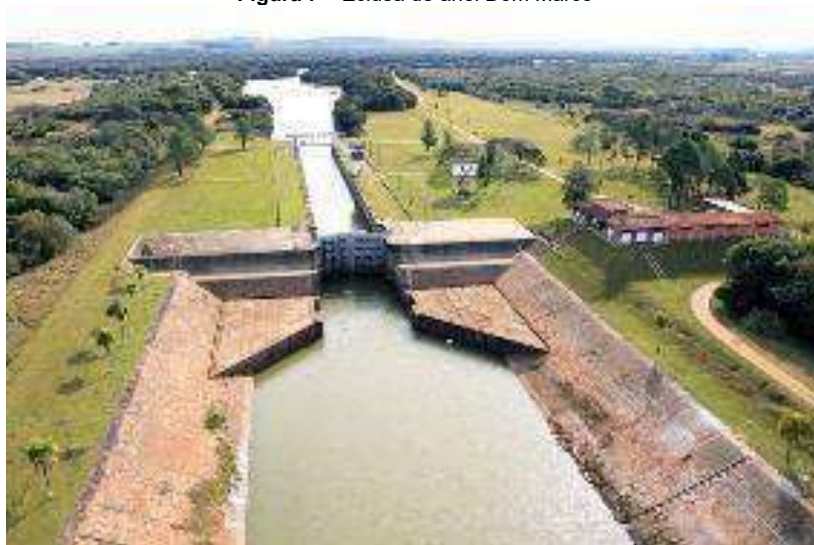
A eclusa e barragem de Anel de Dom Marco (Figura 7 e Figura 8) localiza-se no rio Jacuí, HN-706, município de Rio Pardo, RS. Seu comissionamento data de 1972, encontrando-se em operação na jurisdição da Superintendência Regional do DNIT no Estado do Rio Grande do Sul – SR/RS.

Características técnicas:

- Tipologia: Barragem tipo semimóvel, com dois vertedouros fixos, junto às margens e quatro vãos móveis reguladores (comportas de

descarga);

- Câmara (m): 17,00 x 120,00 x 2,50 (Largura x Comprimento x Profundidade);
- Diferença de nível (m): 7,10;
- Porta a Montante: Tipo Esquadria (duas folhas) 6,50 x 9,00 m (Altura x Largura);
- Porta a Jusante: Tipo Esquadria (duas folhas) 14,50 x 9,00 m (Altura x Largura);
- Lat.: -30.0901609;
- Long.: -52.49555556.

Figura 7 – Eclusa de anel Dom Marco

Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

Figura 8 – Barragem do Anel Dom Marco

Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

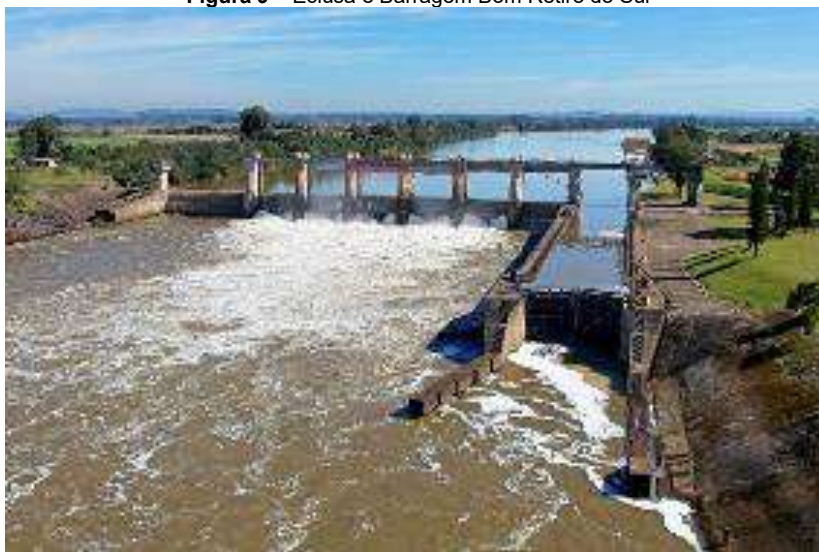
O complexo eclusa e barragem de Bom Retiro do Sul (Figura 9) foi implantado no Rio Taquari, HN-710, no município de Bom Retiro do Sul, RS. Seu comissionamento data de 1976. O sistema é operado e mantido pela Superintendência Regional do DNIT no Estado do Rio Grande do Sul – SR/RS.

Características técnicas:

- Tipologia: Barragem tipo móvel, com 6 comportas tipo vagão e vertedouro fixo,

próximo à margem direita;

- Câmara (m): 17,00 x 120,00 x 2,50 (Largura x Comprimento x Profundidade);
- Diferença de nível (m): 11,80;
- Porta a Montante: Barriga de Peixe Tipo 6,50 x 18,00 m (Altura x Largura);
- Porta a Jusante: Tipo Esquadria (duas folhas) 16,50 x 9,00 m (Altura x Largura);
- Lat.: -29.6091667;
- Long.: -51.95055556.

Figura 9 – Eclusa e Barragem Bom Retiro do Sul

Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

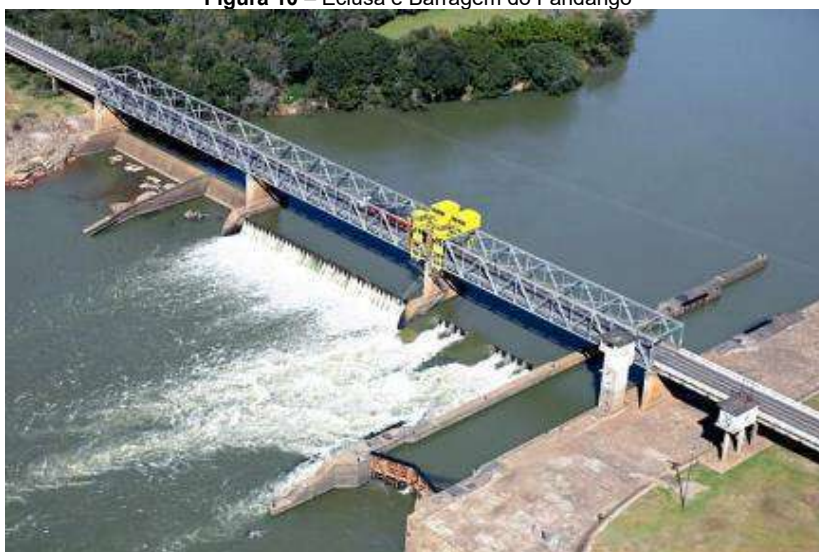
A barragem e eclusa de Fandango (Figura 10) encontra-se no Rio Jacuí, HN-706, município de Cachoeira do Sul, RS, tendo sido comissionada em 1958. Atualmente a operação e manutenção é performada pela Superintendência Regional do DNIT no Estado do Rio Grande do Sul – SR/RS.

Características técnicas:

- Tipologia: Barragem tipo móvel com 2 etapas de regulagem de descarga;
- Alças: 61 alças acionadas por 2 carros de

manobra instalados na estrutura metálica;

- Câmara (m): 15,00 x 85,00 x 2,50 (Largura x Comprimento x Profundidade);
- Diferença de nível (m): 4,00;
- Porta a Montante: Tipo Esquadria (duas folhas) 4,30 x 8,00 m (Altura x Largura);
- Porta a Jusante: Tipo Esquadria (duas folhas) 9,30 x 8,00 m (Altura x Largura);
- Lat.: -30.062824;
- Long.: -52.896985.

Figura 10 – Eclusa e Barragem do Fandango

Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

A eclusa de Jupiá (Figura 11), localizada no Rio Paraná, HN-900, no município de Três

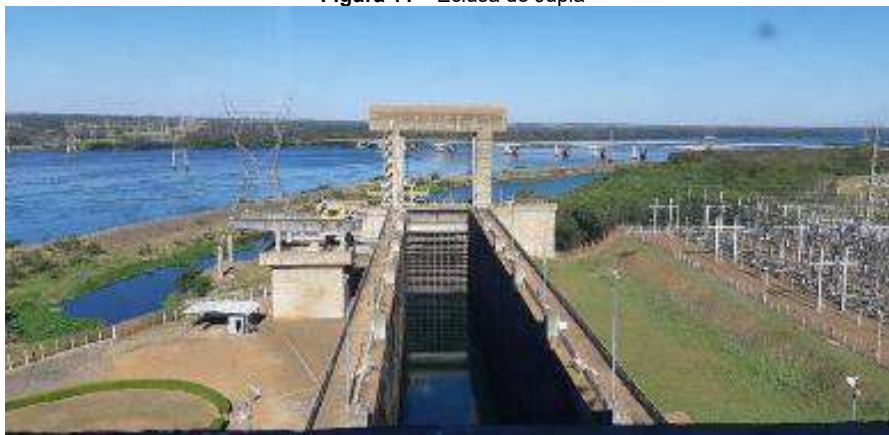
Lagoas, MS, teve seu comissionamento concluído em 1998. Atualmente em operação, o sistema

está sob a responsabilidade da Superintendência Regional do DNIT no Estado de São Paulo – SR/SP.

Características técnicas:

- Câmara (m): 17,00 x 210,00 x 5,00 (Largura x Comprimento x Profundidade);
- Diferença de nível (m): 23,00;
- Porta a Montante: Tipo Esquadria (duas folhas) 8,18 x 9,00 m (Altura x Largura);
- Porta a Jusante: Vagão Tipo 23,00 x 17,00 m (Altura x Largura);
- Lat.: -20.7819444;
- Long.: -51.6333333.

Figura 11 – Eclusa de Jupiaá



Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

Localizada no Rio São Francisco, HN-500, município de Sobradinho, BA, a eclusa de Sobradinho (Figura 12) foi comissionada em 1979. Atualmente a Superintendência Regional do DNIT no Estado da Bahia – SR/BA é a responsável pela operação e manutenção do sistema.

Características técnicas:

- Câmara (m): 17,00 x 120,00 x 2,50 (Largura x Comprimento x Profundidade);
- Diferença de nível (m): 32,50;
- Porta a Montante: Tipo Vagão 18,50 x 18,00 m (Altura x Largura);
- Porta a Jusante: Tipo Esquadria (duas folhas) 38,00 x 9,00 m (Altura x Largura);
- Lat.: -9.4391667;
- Long.: -40.8313889.

Figura 12 – Eclusa de Sobradinho



Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

A eclusa de Três Irmãos (Figura 13) localiza-se no rio Tietê, HN-913, no município de Andradina, SP. O sistema teve seu comissionamento concluído em 1995. Atualmente, o sistema encontra-se fora de operação estando sob a jurisdição da Superintendência Regional do DNIT no Estado de São Paulo – SR/SP.

Características técnicas:

- Número de câmaras: 2;
- Câmara (m): 12,10 x 142,00 x 3,50 (Largura x Comprimento x Profundidade) –ambas as câmaras têm as mesmas dimensões;
- Diferença de nível (m): 24,30 (Eclusa 1) e 25,50 (Eclusa 2);
- Total: 49,80 m;
- Canal intermediário (m): 926,00;
- Eclusa 1 (Jusante):
- Porta a Montante: Tipo de vagão 10,63 x 12,71 m (Altura x Largura);
- Porta a Jusante: Tipo Esquadria (duas folhas) 15,06 x 12,70 m (Altura x Largura);
- Eclusa 2 (Valor):
- Porta Montante: Tipo Vagão 6,23 x 12,90 m (Altura x Largura);
- Porta a Jusante: Tipo Esquadria (duas folhas) 21,56 x 12,70 m (Altura x Largura);
- Eclusa 2 (Valor):
- Lat.: -20.6652778;
- Long.: -51.3116667;
- Eclusa 1 (Jusante):
- Lat.: -20.6577778;
- Long.: -51.3052778.

Figura 13 – Eclusas de Três Irmãos



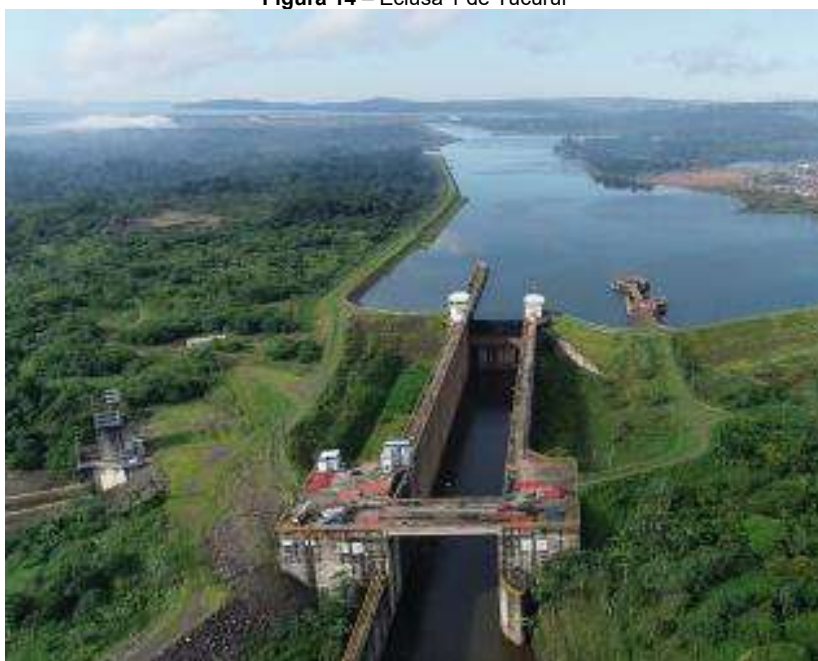
Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

As eclusas de Tucuruí (Figura 14 e Figura 15) foram implantadas no Rio Tocantins, HN-200, no município de Tucuruí, PA. O sistema foi comissionado em 2010, estando em operação restrita sob a responsabilidade da Superintendência Regional do DNIT no Estado do Pará – SR/PA.

Características técnicas:

- Número de câmaras: 2;
- Dimensões (m): 32,00 x 200,00 x 3,00 (Largura x Comprimento x Profundidade);
- Diferença de nível (m): 36,50 (Eclusa 1) e 35,00 (Eclusa 2);
- Total: 71,50 m;
- Canal intermediário (m): 5.500,00;
- Eclusa 1 (Jusante):
- Porta a Montante: Guilhotina Tipo 18,00 x 34,00 m (Altura x Largura);
- Porta a Jusante: Tipo Esquadria (duas folhas) 18,00 x 17,00 m (Altura x Largura);
- Eclusa 2 (Valor):

- Porta a Montante: Vagão Tipo 18,00 x 34,00 m (Altura x Largura);
- Porta a Jusante: Tipo Esquadria (duas folhas) 37,00 x 17,00 m (Altura x Largura);
- Eclusa 1 (Jusante):
- Lat.: -3.8341667;
- Long.: -49.6611111;
- Eclusa 2 (Quantidade):
- Lat.: -3.7808333;
- Long.: -49.6591667.

Figura 14 – Eclusa 1 de Tucuruí

Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

Figura 15 – Eclusa 2 de Tucuruí

Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

3.4 TRANSFERÊNCIA DE RESPONSABILIDADE DE TRANSPORTE

No cenário atual, o DNIT tem oito eclusas sob sua responsabilidade, com uma média de mais de 40 anos de operação. Ao longo desse tempo, suas administrações estiveram a cargo de diferentes divisões e agentes responsáveis, o que

trouxe uma série de problemas técnicos, administrativos e de gestão, alguns ainda presentes, como licenças ambientais compartilhadas com a Usina Hidrelétrica (UHE), dificuldade na regularização de patrimônio, perda de dados históricos de manutenção e operação, e falta de documentação técnica, entre outros.

Além disso, as restrições orçamentárias vivenciadas nos últimos anos também limitaram severamente a capacidade de solução efetiva desses problemas, o que, conseqüentemente, agrava as questões relacionadas à manutenção e obras corretivas.

É nesse cenário de problemas técnicos, administrativos e gerenciais que o DNIT concebeu um programa, com o objetivo de alcançar a efetiva operação, gestão e administração dessas infraestruturas vitais para o transporte de cargas e pessoas na navegação interior.

Um marco legal importante no processo de gestão de eclusas foi a promulgação da Lei 13.081, em 2015, que atribui ao Setor de Transportes as atividades de gerenciamento da operação e manutenção das eclusas como responsabilidades dos sistemas de transposição, inclusive as integradas à Unidade de Geração de Energia Hidrelétrica (UHE) (Brasil, 2015).

Como consequência disso, além das eclusas do Anel de Dom Marco, Amarópolis, Bom Retiro do Sul e Fandango, que já eram administradas pela Autarquia por meio de convênios com a Companhia Docas do Estado de São Paulo (CODESP) e a Companhia Docas do Maranhão (CODOMAR), as operações das eclusas de Tucuruí, Sobradinho, Jupia e Três Irmãos passaram a ser de responsabilidade direta do DNIT.

No entanto, a transferência de responsabilidade para o DNIT não foi totalmente acompanhada no que diz respeito ao intercâmbio de informações técnicas e administrativas. Isso resultou em lacunas importantes nas informações sobre bens patrimoniais e dados operacionais e de manutenção – informações essenciais para o correto planejamento da gestão dessas infraestruturas.

4 PROECLUSAS

Para além dos problemas de gestão anteriores resultantes das sucessivas alterações na gestão e administração das eclusas, acrescentaram-se lacunas de informação/dados sobre as infraestruturas transferidas para o DNIT. Isso gerou sérias dificuldades na identificação das condições materiais em que cada uma dessas eclusas foram encontradas, tendo em vista a ausência de registros históricos consistentes sobre a manutenção dos sistemas/equipamentos. Dessa forma, não havia material que pudesse orientar o detalhamento técnico essencial, na elaboração das especificações de obras/serviços, seus orçamentos e demais documentos necessários aos processos de contratação de recuperações e operação/manutenção dessas eclusas.

4.1 ACORDO ENTRE O DNIT E O USACE

O Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE) e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) do Brasil celebraram um acordo de parceria intergovernamental em 18 de abril de 2016. O Acordo apoia os objetivos de curto e longo prazo do DNIT nas áreas de engenharia fluvial e serviços de navegação fluvial.

Como parte do acordo, o USACE fornece capacitação e transferência de conhecimento aos analistas, engenheiros, planejadores e outros profissionais que atuam em desenvolvimento hidroviário e engenharia fluvial no DNIT.

O USACE fornece recomendações ao DNIT para apoiar as áreas específicas dos programas de operação, manutenção e gerenciamento de ativos de eclusas e barragens. Um dos principais objetivos das recomendações de operação e manutenção é identificar oportunidades para integrar as recomendações em futuros contratos do DNIT. Os contratos específicos de interesse do

DNIT serão os contratos de diagnóstico, operação, manutenção e fiscalização das eclusas e barragens.

O USACE tem pleno conhecimento do PROECLUSAS e fornece suporte técnico ao Programa desde 2018. As atividades já realizadas incluíram:

- 2019: Inspeção *in loco* do USACE e recomendações para cinco eclusas e barragens do DNIT (Tucuruí, Amarópolis, Dom Marco, Bom Retiro do Sul, Fandango);
- 2019: *Workshop* de Projeto de Eclusas e Barragens de Navegação (Brasil);
- 2019: Visita *in loco* e recomendações de condição de emergência para duas eclusas e barragens do DNIT (Jupia e Três Irmãos);
- 2019: Intercâmbio de tecnologia de Eclusas e Barragens (Brasil);
- 2020: Oficina de Manutenção de Eclusas USACE (DNIT *in loco* nos EUA);
- 2020: Oficina de Operações da Eclusa (realizado de forma virtual);
- 2020: Amarópolis *Design Charrette* com participação do USACE e DNIT (virtual);
- 2020-2021: 13 revisões de contrato e comentários do USACE para projetos de Amarópolis para a Contratada do DNIT (virtual);
- 2021: Três revisões de contrato e comentários do USACE para Bom Retiro para a Contratada do DNIT (virtual); e
- 2022: Duas revisões de contrato e comentários do USACE para Dom Marco para a Contratada do DNIT (virtual).

A Figura 16 a seguir apresenta algumas fotos das visitas realizadas no ano de 2019.

Figura 16 – Inspeção diagnóstica em Tucuruí pelo USACE e DNIT (canto superior esquerdo); Inspeção de bombas em Três Irmãos pelo USACE e DNIT (canto superior direito); e pessoal do USACE e DNIT visitando Amarópolis em 2019 (abaixo)



Fonte: Acervo da DAQ/DNIT.

4.2 CONCEPÇÃO E ESTRUTURA DO PROECLUSAS

Nesse contexto, a partir de uma visão integrada dos diversos aspectos técnicos e administrativos envolvidos na operação, manutenção e gestão das eclusas, incluindo os problemas existentes e a falta de informações/dados, foi concebido o PROECLUSAS. Esse

programa se configura em um programa nacional de recuperação, operação, manutenção e gestão de eclusas, que pretende implementar a estrutura e governança necessárias para esse segmento de infraestrutura de transportes, no período de 2019 a 2026.

Com base nas informações recolhidas junto às Administrações Aquaviárias no 1º semestre de

2019, são identificados dados constantes dos relatórios de inspeção da Auditoria Interna do DNIT – AUDINT-DNIT, dos contratos anteriores de eclusas e das visitas técnicas realizadas pela DAQ, com o apoio dos técnicos do USACE. Também se estabeleceram três eixos centrais e estruturantes do programa PROECLUSAS (técnico, administrativo e gerencial) os quais serão apresentados de forma detalhada a seguir:

4.2.1 EIXO ESTRUTURANTE TÉCNICO

A estruturação analítica do eixo técnico inclui atividades relacionadas à operação e manutenção das eclusas; realização de diagnósticos; consolidação/revisão de documentação técnica; obtenção/manutenção das licenças necessárias e planejamento e elaboração de especificações técnicas para as intervenções maiores que se fizerem necessárias.

Como mencionado anteriormente, havia lacunas nas informações técnicas consolidadas sobre as eclusas, o que impossibilitava, com a menor confiabilidade possível, a contratação de empresas especializadas na operação e manutenção das eclusas. Por isso, no 2º semestre de 2019, a DAQ concebeu uma metodologia que, de forma técnica e consistente, permitiria, em sua fase inicial (chamada de fase de diagnóstico e retomada operacional), realizar os diagnósticos necessários nas eclusas, possibilitando o seu retorno gradual às condições de operação e manutenção. Essa fase inicial foi seguida por uma “fase de consolidação de O&M”, que se configura por contratos de longo prazo para operações e ações de manutenção regulares e contínuas, já customizadas e orientadas pela fase de diagnóstico.

Assim, com essa concepção, adotou-se como premissa e elemento inicial a realização de contratos padronizados de curto prazo (cerca de

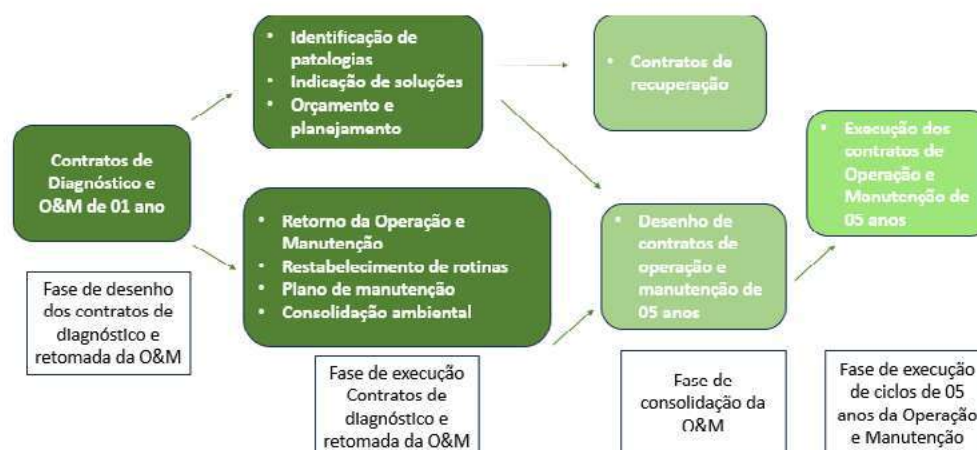
12 meses), visando prioritariamente a realização de diagnósticos nos diversos sistemas/equipamentos das eclusas (civil, elétrica, mecânica, hidráulica, automação etc.). Dessa forma, seria possível a retomada gradual e monitorada das operações e manutenção das eclusas e, em paralelo, a coleta/consolidação/revisão de todo o acervo técnico.

A partir das modalidades de contratos, a DAQ e as Superintendências estabeleceram modelos de termos de referência padronizados para a contratação da execução e supervisão da fase “O&M” consolidada (contratos com duração de cerca de 5 anos).

Paralelamente, os diagnósticos realizados na fase inicial orientaram a contratação de serviços de recuperação de maior porte, entendidos aqui como aqueles serviços que não se enquadram no rol de atividades regulares de manutenção dos sistemas e equipamentos das eclusas. O detalhamento técnico das patologias encontradas, a indicação das soluções recomendadas, o levantamento de custos, as listas de insumos/materiais/equipamentos e mão de obra associada e os prazos de execução de cada intervenção (obras/serviços) são informações essenciais. Essas informações permitem o gerenciamento e o correto planejamento dessas intervenções por parte da DAQ e das superintendências, o que inclui a elaboração do termo de referência para os contratos de recuperação e a inclusão de estimativas mais realistas na elaboração de propostas orçamentárias.

Atualmente, os contratos de diagnósticos do DNIT para as eclusas de Tucuruí, Sobradinho, Três Irmãos e Jupia foram concluídos. Em síntese, a metodologia pode ser expressa na Figura 17.

Figura 17 – Estruturação de contratos



Fonte: Elaboração própria

Os serviços de operação e manutenção de eclusas podem ser considerados, conceitualmente, como serviços técnicos rotineiros e padronizados, não diferindo significativamente de uma infraestrutura para outra, ocorrendo apenas pequenas adaptações em função das especificidades de seus sistemas ou equipamentos. Portanto, do ponto de vista gerencial, considerou-se desejável padronizar contratos que contemplassem a gama de atividades de O&M, de forma eficiente e econômica (evitando múltiplos contratos). Ao mesmo tempo, essa padronização permite medições, análises e monitoramento do desempenho das eclusas, com vistas a identificar e corrigir sua gestão, seja de natureza técnica ou administrativa.

A padronização do termo de referência levou à elaboração de uma lista de produtos comuns que serão executados pelas contratadas. Esses produtos foram mais bem especificados/orientados para abranger toda a gama de atividades técnicas diretas e indiretas associadas às rotinas e serviços de O&M dessas infraestruturas, mitigando, com isso, a ocorrência de possíveis lacunas nos serviços necessários.

É importante salientar que, à medida que se

desenvolvem alguns ciclos correspondentes à fase de "consolidação de O&M" (contratos de cerca de 5 anos), os dados históricos recolhidos sobre a manutenção e operação dessas infraestruturas facilitarão uma possível adoção, no futuro, de um modelo de contratação que remunere o contratado pelo nível de disponibilidade e pelo desempenho das atividades de O&M, como já acontece com os portos da Amazônia.

Assim como nos contratos de execução, os contratos de supervisão também foram padronizados, tanto nos contratos de "Diagnóstico e O&M de 1 ano" quanto nos "Contratos de O&M de 5 anos". O DNIT executa contratos de supervisão e O&M para todas as eclusas federais e atualmente tem contratos ativos de cinco anos para todas as oito eclusas (Tabela 1).

Os contratos de supervisão englobam todos os serviços associados ao monitoramento e controle de todas as atividades e serviços relacionados à O&M das eclusas. As tarefas representativas do contrato de supervisão incluem: inspeção e verificação de documentação e notas fiscais associadas à execução de serviços; apoio ao planejamento e supervisão de

serviços de manutenção hidráulica, eletrônica e eletromecânica; monitoramento de registros de embarcações bloqueadas e registros de nível de água de rios; e emissão de relatórios técnicos e de medição mensais (Tabela 2).

Os contratos de O&M abrangem a execução de todas as tarefas de O&M, bem como a consolidação e revisão da documentação técnica associada às eclusas. As tarefas representativas de O&M incluem: conformidade com

especificações e regulamentos em eclusas e manuais de O&M; complementação e atualização de manuais de O&M de eclusas com base nas lições aprendidas para otimizar serviços, aumentar a vida útil dos equipamentos e aumentar a segurança; serviços de manutenção hidráulica, eletrônica e eletromecânica, e registro do movimento das embarcações eclusadas e dos níveis do rio (Tabela 2).

Tabela 2 – Informações resumidas para todos os contratos de DNIT, Supervisão de Eclusas e O&M

Eclusas			Contratos de Supervisão			Contratos de O&M		
Eclusa	Estado	Rio	Ano	Duração Anos	Valor Estimado R\$ Bilhões	Ano	Duração Anos	Valor Estimado R\$ Bilhões
Tucuruí	Para	Tocantins	2022	5	R\$ 6.7	2022	5	R\$ 33.8
Sobradinho	Bahia	Sao Francisco	2021	5	R\$ 5.7	2021	5	R\$ 26.3
Tres Irmaos	Sao Paulo	Tiete	2023	5	R\$ 12.1	2022	5	R\$ 43.6
Jupia	Sao Paulo	Parana						
Bom Retiro do Sul	Rio Grande do Sul	Taquari	2021	5	R\$ 2.8	2021	5	R\$ 33.1
Amarópolis	Rio Grande do Sul	Jacui						
Dom Marco	Rio Grande do Sul	Jacui						
Fandango	Rio Grande do Sul	Jacui						

Fonte: Elaboração própria

Para as eclusas integradas às Usinas Hidrelétricas (UHE) que passaram a ser de responsabilidade do DNIT, ainda que compartilhando parte da infraestrutura e instalações com a UHE, tornou-se necessário estabelecer acordos operacionais entre as concessionárias de geração de energia e as contratadas do DNIT. Esses acordos têm como finalidade a operação e manutenção das eclusas, de modo que sejam definidas as responsabilidades das partes em áreas ou ações em infraestruturas compartilhadas, bem como o apoio mútuo em casos de emergências das instalações, minimizando/mitigando os impactos mútuos.

Esses acordos devem ser derivados de documentos de cooperação de nível superior entre o DNIT e a ANEEL. As atribuições e responsabilidades contidas nos contratos operacionais entre a concessionária e a executora

estão espelhadas nos contratos de O&M de 5 anos.

4.2.2 EIXO ADMINISTRATIVO

O eixo administrativo cuidava da regularização dos bens móveis ou imóveis pertencentes à eclusa, com inventário completo de todos os bens permanentes existentes nas dependências da eclusa.

Pela inclusão no patrimônio líquido do DNIT de imóveis alienados de outras empresas em particular, foi estabelecida uma metodologia para mensuração do valor das eclusas, bem como critérios e proposta para o desmembramento do terreno das eclusas da UHE.

Também estão contemplados nesse eixo os contratos auxiliares como manutenção predial, vigilância, energia elétrica etc.

4.2.3 EIXO GESTÃO

No eixo de gestão, elencamos a priorização de iniciativas para a proposta orçamentária, a gestão orçamentária, por meio da alocação de recursos, e o acompanhamento do orçamento vigente. Em termos de gestão de contratos, acompanhou-se o cronograma de execução e procedeu-se ao monitoramento e pagamento das obrigações decorrentes desses contratos.

Para as novas eclusas cuja responsabilidade pela operação e manutenção eventualmente sejam transferidas do setor elétrico para o DNIT, foram estabelecidos procedimentos técnicos e administrativos para recebê-las.

5 RESULTADOS

A implementação gradual dos conceitos definidos no programa PROECLUSAS, juntamente com o apoio e consultoria fornecidos pelo USACE, vem se traduzindo em melhorias constantes nas condições operacionais observadas no campo. Outro avanço foi a padronização gradual dos processos envolvidos na gestão da manutenção e controle de ativos físicos como equipamentos, instalações imobiliárias etc. A Tabela 3 mostra a evolução da disponibilidade operacional das eclusas desde a implantação do programa em 2019.

Tabela 3 – Informações resumidas sobre evolução da disponibilidade operacional

ECLUSAS	NOV/19	NOV/21	JAN/22	JUN/22	JAN/23
TUCURUÍ	●	●	●	●	●
TRÊS IRMÃOS	●	●	●	●	●
JUPIÁ	●	●	●	●	●
SOBRADINHO	●	●	●	●	●
BOM RETIRO	●	●	●	●	●
AMARÓPOLIS	●	●	●	●	●
ANEL DE DOM MARCO	●	●	●	●	●
FANDANGO	●	●	●	●	●
TOTAL					
OPERACIONAL	4	7	7	7	7
NÃO OPERACIONAL	4	1	1	1	1
% OPERACIONALIDADE	50%	88%	88%	88%	88%

● Não operacional; ● Operacional

Fonte: Elaboração própria

Observa-se que atualmente apenas um equipamento ainda está fora de operação, tendo em vista uma questão relacionada à contratação do fornecimento de energia elétrica. Esse

processo tem se mostrado mais complexo do que o esperado, mas já está próximo de ser concluído. As Figuras 18 e 19 mostram algumas das principais atividades de manutenção.

Figura 18 – Movimentação da Estrutura (Eclusa de Tucuruí - Eclusa 2)

Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

Figura 19 – Posicionamento do corte de fluxo (Eclusa de Tucuruí - Eclusa 1)

Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

Outra observação importante é o fato de que atualmente todas as eclusas possuem sistemas CMMS para monitorar sua manutenção, o que representa um grande salto em relação à situação encontrada antes do início do programa, conforme apresentado na Tabela 4

Tabela 4 – Informações resumidas CMMS

ECLUSAS COM CMMS	2018	2023
TUCURUÍ	●	●
TRÊS IRMÃOS	●	●
JUPIÁ	●	●
SOBRADINHO	●	●
BOM RETIRO	●	●
AMARÓPOLIS	●	●
ANEL DE DOM MARCO	●	●
FANDANGO	●	●

● SEM CMMS; ● COM CMMS

Fonte: Elaboração própria

O último grande resultado obtido com a implantação do programa é que todas as eclusas estão sob contratos de operação e manutenção

de longo prazo (05 anos), os quais foram padronizados respeitando as especificidades de cada projeto (Tabela 5).

Tabela 5 – Informações resumidas sobre contratos de operação e manutenção

ECLUSAS COM CONTRATOS DE LONGO PRAZO	2018	2023
TUCURUÍ	●	●
TRÊS IRMÃOS	●	●
JUPIÁ	●	●
SOBRADINHO	●	●
BOM RETIRO	●	●
AMARÓPOLIS	●	●
ANEL DE DOM MARCO	●	●
FANDANGO	●	●

● SEM CONTRATOS LONGOS; ● COM CONTRATOS LONGOS

Fonte: Elaboração própria

As melhorias apresentadas resultam principalmente da convergência de esforços dos diversos atores (Diretoria, Superintendência, Coordenações Setoriais, etc.) que compõem a governança das eclusas para alcançar os processos de identificação, avaliação, seleção, aquisição, monitoramento e alienação desses ativos de forma eficiente e eficaz. Isso inclui o gerenciamento de riscos associados aos ativos e o rastreamento informatizado de sua manutenção e reparo, além da garantia de sua disponibilidade para dar suporte à operação da organização.

Apesar dos resultados alcançados, ainda há muito a ser feito para atingir plenamente o objetivo estratégico de alcançar um alto nível de serviço e maximizar o retorno do investimento para a sociedade. O nível de excelência buscado envolve esforços constantes para reduzir custos, melhorar a qualidade dos serviços prestados, aumentar a segurança e a confiabilidade de nossos equipamentos.

Alguns dos diversos serviços executados nos contratos de operação e manutenção de eclusas podem ser vistos na Figura 20.

Figura 20 – Serviços de manutenção realizados nas Eclusas

a) Inspeção da Porta da Guilhotina (Eclusa de Tucuruí)



b) Inspeção do centro hidráulico de enchimento (Eclusa de Tucuruí)



(continua)

c) Instalação de válvulas após calibração na unidade hidráulica da ponte basculante (Eclusa de Sobradinho)



d) Manutenção preventiva dos componentes elétricos do painel de controle (Eclusa de Sobradinho)



e) Bombas de drenagem operacionais (Eclusa Três Irmãos)



f) Equalização dos níveis da câmara (Eclusa de Jupia)



Fonte: Acervo da DAQ/DNIT

6 CONCLUSÕES

O PROECLUSAS tem se mostrado um programa satisfatório e tem alcançado resultados efetivos, considerando o curto tempo de implantação. Foram introduzidos contratos padronizados de operação e manutenção, realizados diagnósticos e projetos de modernização, considerando as particularidades e especificidades de cada eclusa.

Como etapas futuras, o PROECLUSAS prevê a realização de obras de modernização e recuperação, implantação de sistema de gestão de manutenção, regularização ambiental e/ou licença de operação e regularização de bens móveis e imóveis com o objetivo de proporcionar eclusas em plenas condições de operação e contribuir para o desenvolvimento do transporte aquaviário no Brasil.

De modo geral, o programa apresenta bons resultados, mas necessita de melhorias futuras para seu aprimoramento conforme será descrito no próximo capítulo.

7 ABRAÇANDO O PROGRESSO: OS PRÓXIMOS PASSOS PARA O TRABALHO FUTURO

O USACE forneceu um relatório com recomendações ao DNIT para apoiar as áreas específicas dos programas de operação, manutenção e gestão de ativos de eclusas e barragens. Um dos principais objetivos do relatório é identificar oportunidades para integrar as recomendações em futuros contratos DNIT.

A implementação de um programa de gestão de ativos/gestão de manutenção eficaz é fundamental para o sucesso do PROECLUSAS. As principais ações incluem o estabelecimento de

inspeções uniformes das condições; realização de avaliações de risco; utilização de um sistema centralizado de gestão da manutenção informática; e desenvolvimento dos elementos fundamentais de um programa de manutenção.

As recomendações operacionais incluem: desenvolvimento de planos de ação hidroviários para facilitar a circulação segura e ordenada do tráfego durante a evolução das condições dos rios; implementação de programa de treinamento de operadores de eclusas e barragens; e a implementação de um sistema de rastreamento da eclusa baseado na web. Esses esforços melhorariam o conhecimento dos usuários das hidrovias sobre as condições de operação e

padronizariam as políticas e procedimentos do DNIT.

As recomendações de contratação para reduzir o tempo necessário para reparos além do escopo dos contratos atuais de O&M incluem o desenvolvimento e a implementação de um contrato adicional focado em grandes reparos e reabilitação. Além disso, também se recomendou instrumentos de contratos regionais para suporte técnico do fabricante de componentes PLC e suporte qualificado ao integrador de sistemas. O USACE também recomendou contratação recorrente para executar inspeções de instalações de engenharia. Isso reduziria o longo prazo necessário para o desenvolvimento de contratos individuais.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Lei Nº 10233, de 05 de junho de 2001**. Dispõe sobre a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre, cria o Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte, a Agência Nacional de Transportes Terrestres, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, 2001.

BRASIL. **Lei Nº 13.081, de 02 de janeiro de 2015**. Dispõe sobre a construção e a operação de eclusas. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **GLOSSÁRIO HIDROVIÁRIO**. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/glossario-hidroviario>. Acesso em: 8 mar. 2023.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. IPEA. **Hidrovias no brasil**: perspectiva histórica, custos e institucionalidade. 2014. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/2714/1/TD_1931.pdf. Acesso em: 4 mar. 2023.

NEEDHAM, Joseph. **Science and Civilization in China**. 4 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1971.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), 2022. **Engineer Circular 1130-2-XXXX, Project Operations**: Locks and Dams Maintenance Standards (Final Draft). 46 pp.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), 2013. **Maintenance Management Improvement Plan**. USACE Asset Management, U.S. Army Corps of Engineers, Directorate of Civil Works. 73 pp.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), 2022. **McAlpine Locks and Dam Operations and Maintenance**, Section 3-2-2 Preparations Against Flooding. P. 43 of 135.

ALUGUEL SOCIAL NO ÂMBITO DO PROGRAMA CONCILIA BR-381 E ANEL - PRINCIPAIS APRENDIZADOS E SUGESTÕES PARA PROGRAMAS FUTUROS

SOCIAL HOUSING IN THE RESETTLEMENT PROGRAM “CONCILIA BR-381 E ANEL” - LESSONS LEARNED AND SUGGESTIONS FOR FUTURE PROGRAMS

Laura Maria Alves Vaz Martins - lauramavm@gmail.com - <https://orcid.org/0009-0004-6935-2941>

Michele Mitie Arake Fragoso - michele.fragoso@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0004-9271-1543>

Tiago Cardoso Ferreira - tiago.ferreira@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0009-0003-4940-8664>

Glicia Oliveira Soares - glicia.soares01@gmail.com - <https://orcid.org/0009-0007-9910-3040>

Diarlon Cesar Torres - diarlont@gmail.com - <https://orcid.org/0009-0004-0808-6125>

RESUMO: Aluguéis sociais são benefícios amplamente utilizados para viabilizar moradias sem a transferência de propriedade do imóvel. No âmbito do DNIT, possui caráter excepcional e temporário destinado ao atendimento de famílias que necessitam ser realocadas por obras de infraestrutura. Por meio do programa de reassentamento “Concilia BR-381 e Anel”, em Minas Gerais, primeira experiência do DNIT na execução e no acompanhamento de aluguéis sociais, 168 famílias receberam o referido benefício. A gestão do programa de aluguel inclui planejamento adequado a fim de que se possam desocupar áreas de interesse com a maior agilidade, evitando-se atrasos e conflitos com a população impactada. Nesse sentido, propõe-se avaliação do programa de aluguel social do programa Concilia, bem como sugestão de boas práticas para futuras ações desse modelo.

PALAVRAS-CHAVE: aluguel social; obras de infraestrutura; programas de reassentamento; DNIT.

ABSTRACT: Social housing is a governmental benefit widely used to provide housing without transferring ownership. The Brazilian National Department of Infrastructure and Transportation (DNIT) applies it in exceptional and temporary cases to assist families being relocated due to infrastructure projects. The “Concilia BR-381 e Anel” resettlement program in Minas Gerais, it is DNIT’s first experience in implementing and monitoring this benefit for 168 families. Managing the program includes strategic planning so the areas of interest can be obtained as quickly as possible, to avoid delays and conflicts with the impacted populations. This article aims to assess Concilia’s social housing program and to suggest good practices for implementing similar ones in the future.

KEYWORDS: social housing; infrastructure projects; resettlement programs; DNIT.

1 INTRODUÇÃO

Aluguel social ou locação social consiste em programa ou ação do Estado, podendo haver ou não parceria com o setor privado, para viabilizar acesso à moradia por meio de pagamento de

taxas e/ou aluguel, sem haver a transferência de propriedade do imóvel para o beneficiário (Balbim, 2015).

Aluguel social é benefício frequentemente utilizado com vistas ao enfrentamento de

situações emergenciais, como calamidades e habitações em áreas de risco estrutural ou geológico, bem como visando o combate do déficit habitacional no país.

Outra possibilidade de implementação de programas de aluguel social é o atendimento a famílias desabrigadas por obras de infraestrutura, enquanto a solução definitiva de reassentamento não é viabilizada.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), com vistas à liberação de áreas para execução das obras de infraestrutura de transporte, pode realizar a remoção e o reassentamento de famílias impactadas, desde que obedecidos os requisitos elencados na publicação da norma IPR-750/2022:

- Necessidade de remoção das ocupações irregulares como nexos causal direto da execução do respectivo empreendimento viário;
- Existência de previsão orçamentária;
- Análise de oportunidade e conveniência por parte da área técnica do DNIT; e
- Aferição de vulnerabilidade socioeconômica das famílias que serão removidas.

Atualmente, o referido normativo prevê o aluguel social como modalidade provisória de reassentamento. O programa Concilia BR-381 e Anel, em Minas Gerais, foi a primeira experiência desta autarquia na execução e no acompanhamento dessa modalidade. Entre os anos de 2013 e 2021, 168 famílias foram beneficiadas pelo aluguel social no Anel Rodoviário e na BR-381.

Cumprido ressaltar que, no âmbito do DNIT, é medida excepcional e possui caráter temporário, devendo ser implementada nos casos em que há urgência de remoção de famílias para a viabilização de empreendimento viário ou quando o DNIT, em virtude da execução de obras, der

causa a prejuízos e a avarias em moradias.

Importante mencionar que o contrato de aluguel social segue as regras de Direito Civil, em especial a Lei nº 8.245, de 18 de outubro de 1991, também chamada Lei do Inquilinato, à qual todo contrato de locação de imóveis se submete.

Nesse contexto, este artigo tem como objetivo analisar os dados do programa de aluguel social e propor soluções para execução de programas futuros.

2 HISTÓRICO DO PROGRAMA DE REASSENTAMENTO CONCILIA BR-381 E ANEL

No Programa de Reassentamento “Concilia BR-381 e Anel”, o benefício do aluguel social surgiu em função da necessidade de liberação da área denominada Vila da Paz, para a realização das obras emergenciais de reparação do viaduto localizado no Km 21 do Anel Rodoviário de Belo Horizonte (BR-381/MG-Norte).

Em 12 de novembro de 2012, a Defensoria Pública da União (DPU) ajuizou a Ação Ordinária nº 0056588-88.2012.4.01.3800, com o objetivo de garantir o direito de moradia de onze famílias que moravam embaixo do referido viaduto. A DPU requereu a remoção, de forma imediata, de oito famílias em situação de maior vulnerabilidade, frente à ameaça de danos iminentes.

Em 28 de outubro de 2013, o Ministério Público Federal (MPF) e a DPU, em litisconsórcio, ajuizaram a Ação Civil Pública (ACP) nº 5736709.2013.4.01.3800. Essa ACP tinha como objetivo garantir que a população de baixa renda, que morava em áreas próximas à rodovia BR-381/MG-Norte e que seria atingida pelas obras, tivesse seus direitos respeitados no processo de remoção. Em síntese, a DPU e o MPF requereram, cautelarmente, medidas urgentes ou emergenciais para a remoção de pessoas ou famílias, sempre que necessário, enquanto não

concluído o processo de reassentamento.

Em 25 de novembro de 2013, a Justiça Federal relatou que, para atender ao pedido cautelar da ACP: *“assegurar medidas urgentes ou emergências de remoção de pessoas ou famílias, sempre que necessário, enquanto não concluído o processo de reassentamento”*, fazia-se necessário o abrigo provisório em vila de passagem ou pagamento de aluguel social.

Em 20 de maio de 2014, a Justiça Federal acolheu a sugestão da DPU de ampliação do escopo de valores do aluguel social, para que variassem até um máximo de R\$ 900,00 (novecentos reais). Dessa forma, o número de membros do núcleo familiar passou a ser considerado para definição do valor do aluguel social da seguinte forma:

- famílias com até 4 (quatro) membros, benefício de até R\$ 500,00 (quinhentos reais);
- famílias de 5 (cinco) a 7 (sete) membros, benefício de até R\$ 700,00 (setecentos reais);
- famílias com mais de 7 (sete) membros, benefício de até R\$ 900,00 (novecentos reais).

Importante destacar que também se discutiu a viabilidade de abrigar essas famílias em vila de passagem, modalidade de reassentamento provisória em que composições familiares são realocadas coletivamente em local com infraestrutura adequada. Após estudos preliminares, concluiu-se que essa opção não se mostrava vantajosa do ponto de vista econômico e logístico.

Em 29 de janeiro de 2015, famílias que ocupavam a faixa de domínio da BR-381/MG-Norte (Caeté a Governador Valares) também foram incluídas no benefício do aluguel social. A Justiça Federal proferiu decisão autorizando a liberação de recursos para pagamento de indenização, auxílio-mudança e aluguel social

para 17 famílias.

Ressalta-se que, em que pese o benefício do aluguel social para as famílias oriundas da BR-381/MG-Norte ter sido deferido por curto prazo, alguns benefícios se estenderam ao longo do tempo. Constatam na ACP, deferimentos judiciais de prorrogação desses aluguéis por diversas razões, como dificuldade de encontrar imóveis para aquisição, no valor máximo autorizado pelo programa à época, além da morosidade de repasse de recurso para os beneficiários pela Justiça Federal.

Em 7 de dezembro de 2015, os critérios para concessão do aluguel social foram discutidos novamente, em audiência na Justiça Federal, com a participação da DPU, MPF, DNIT, Comunidade de Moradores de Áreas de Risco (CMAR) e Instituto Rondon Minas. Após debates, acordou-se, naquela data, que, para a concessão do benefício, deveriam ser observados os seguintes critérios:

- 1) famílias ocupantes de áreas de risco geológico, estrutural ou vinculado à atuação do DNIT, na área de influência do empreendimento;
- 2) famílias ocupantes de áreas que interferiam nas obras das Rodovias (Anel Rodoviário de BH e BR-381/Norte);
- 3) tempo de ocupação anterior a dezembro/2012 (data-corte);
- 4) risco atual ou iminente;
- 5) perfil socioeconômico atendido pela DPU;
- 6) voluntariedade da família de aderir ao benefício.

Até o segundo semestre de 2016, 169 famílias haviam sido incluídas no benefício do aluguel social. Dessas, 104 famílias residiam na capital mineira, nas vilas da Paz, Luz e Pica-Pau, localizadas no anel rodoviário, e 65 residiam em municípios localizados ao longo da BR-381/MG-Norte.

Em 26 de abril de 2017, foi celebrado o Acordo Judicial nº 001/2017, no âmbito da ACP, entre MPF, DPU, DNIT, Município de Belo Horizonte, Companhia Urbanizadora e de Habitação de Belo Horizonte (URBEL) e CMAR. O referido acordo estabeleceu que fosse priorizado o reassentamento definitivo das 124 famílias beneficiárias do aluguel social na época.

Destaca-se que o último pagamento de aluguel social ocorreu em maio de 2021, ocasião na qual foi reassentada definitivamente a última família que recebia o benefício.

3 ANÁLISE DE DADOS DO PROGRAMA CONCILIA BR-381 E ANEL

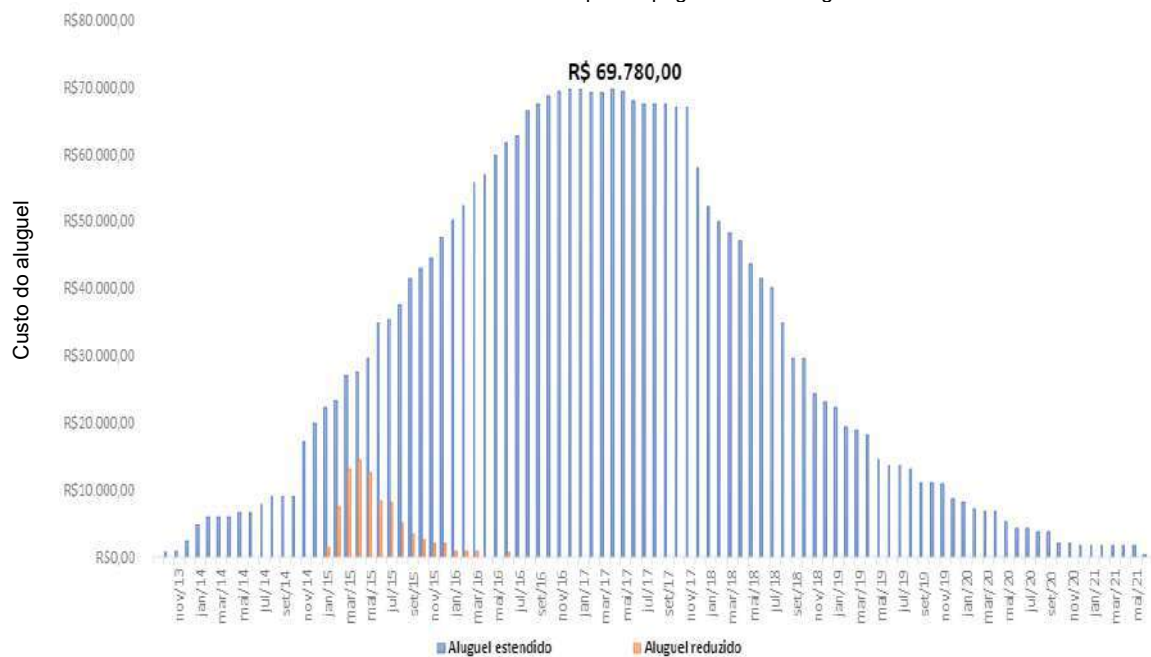
No âmbito do programa Concilia BR-381 e Anel, concederam-se aluguéis sociais às famílias

cadastradas, os quais foram classificados em:

- Aluguel social ordinário: benefício com prazo definido de até quatro meses, concedido por decisão judicial em 2014.
- Aluguel social estendido: benefício de aluguel que se estendeu além do prazo inicialmente fixado em contrato.

Quanto ao aluguel social ordinário, o primeiro contrato teve início em janeiro de 2015. Conforme se verifica no Gráfico 1, em abril de 2015, alcançou-se o auge do custo do benefício, totalizando desembolso de R\$ 14.500 (quatorze mil e quinhentos reais), com 26 famílias beneficiárias. O último pagamento desse aluguel foi realizado em junho de 2016, totalizando R\$ 700,00 (setecentos reais) para uma família beneficiária.

Gráfico 1 – Valores desembolsados para o pagamento do aluguel social



Fonte: Elaboração própria

Quanto ao aluguel social estendido, conforme se verifica no referido gráfico, inicialmente, em outubro de 2013, o custo total era de R\$ 4.000,00 (quatro mil reais), quando havia 8 (oito) famílias no benefício. O pico de custo mensal do programa foi de R\$ 69.780,00 (sessenta e nove mil,

setecentos e oitenta reais) e ocorreu nos meses de dezembro de 2016 e janeiro de 2017, quando havia 123 famílias no benefício. Por fim, o benefício cessou em junho de 2021, no custo mensal de R\$ 500,00 (quinhentos reais), quando havia uma família no benefício.

Destaca-se que o pico do custo mensal em dezembro de 2016, bem como a redução do custo mensal a partir dessa data, se deveu à mudança de gestão na condução do programa, com o cancelamento de novas concessões do benefício.

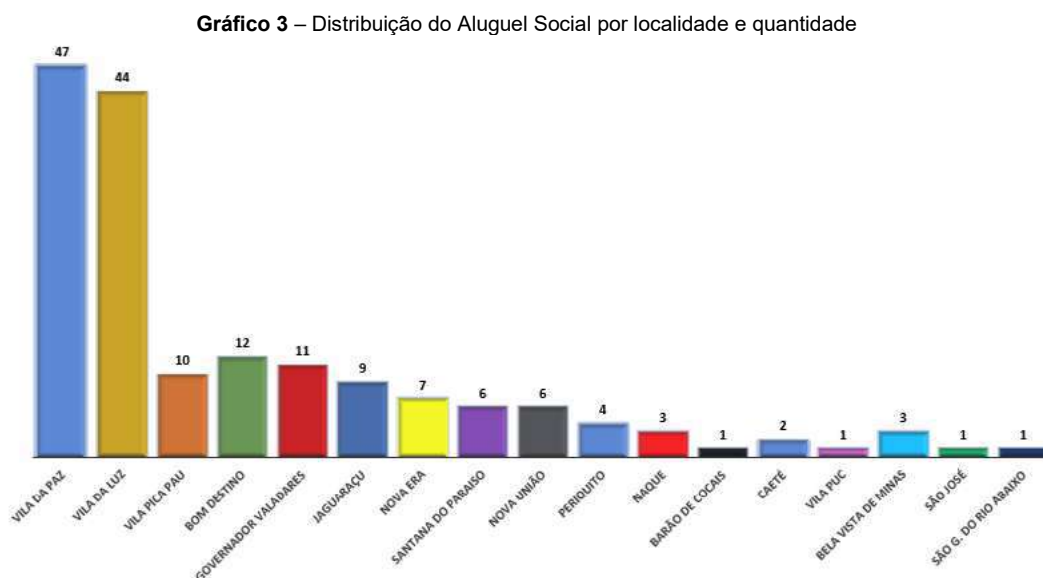
Nesse contexto, conforme se verifica no Gráfico 2, o custo total com aluguel social

(ordinário e estendido) no programa “Concilia BR-381 e Anel” foi de R\$ 2.872.982,41 (dois milhões, oitocentos e setenta e dois mil, novecentos e oitenta e dois reais e quarenta e um centavos), no período de outubro de 2013 a junho de 2021.



Fonte: Elaboração própria

Das 169 famílias inseridas no benefício, a maioria é oriunda da Vila da Paz (28 %) e da Vila da Luz (26 %), sendo as demais famílias oriundas das outras vilas do Anel Rodoviário de Belo Horizonte e dos municípios ao longo da BR -381/Norte, conforme detalhado no Gráfico 3 a seguir.

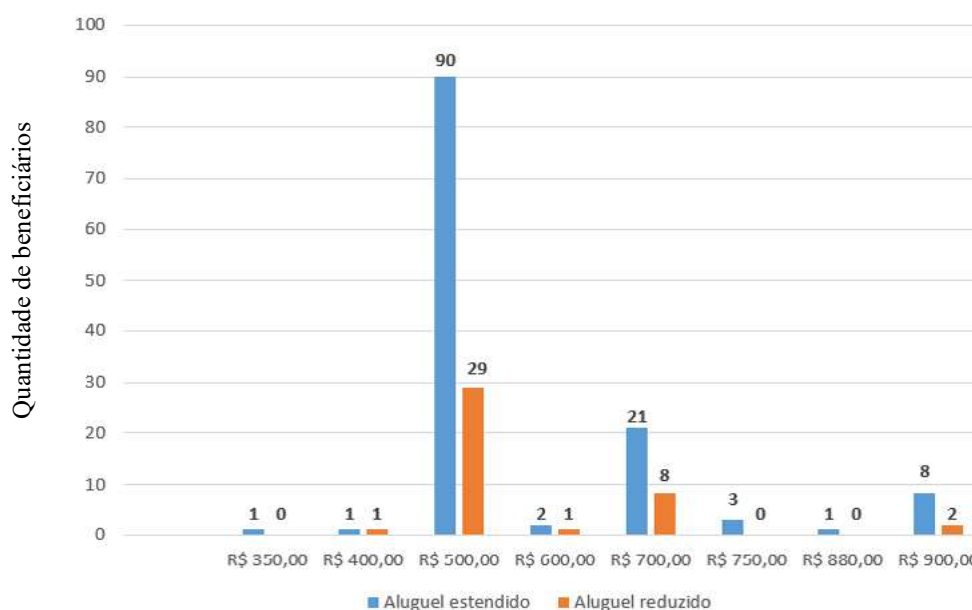


Fonte: Elaboração própria

Além disso, os valores máximos do benefício do aluguel social eram concedidos em função do número de membros do núcleo familiar, variando entre R\$ 500,00 (quinhentos reais), R\$ 700,00 (setecentos reais) e R\$

900,00 (novecentos reais). Nesse contexto, cerca de 71 % (setenta e um por cento) do total dos benefícios concedidos foram no valor de R\$ 500,00 (quinhentos reais), conforme Gráfico 4 a seguir.

Gráfico 4 – Quantitativo de aluguéis sociais concedidos por valor e tipo



Fonte: Elaboração própria

Do total das 169 famílias beneficiadas pelo aluguel social, 161 foram reassentadas definitivamente pelo Programa. Sete famílias tiveram o benefício excluído e uma família teve o benefício cancelado. As exclusões e cancelamento se devem a motivos diversos como: participação prévia em outros programas de reassentamento, decisão do Conselho Executivo do Programa, desistência ou óbito do beneficiário.

4 SOLUÇÕES PARA EXECUÇÃO DE PROGRAMAS DE ALUGUEL SOCIAL FUTUROS

Conforme descrito na introdução, o programa “Concilia BR-381 e Anel” foi a primeira experiência do DNIT na execução e no acompanhamento de benefícios de aluguéis sociais.

Em 2013, tendo em vista a judicialização do

programa, o acompanhamento e o pagamento dos aluguéis eram feitos diretamente pela Justiça Federal, ou seja, os instrumentos de contrato foram celebrados sem a participação do DNIT.

A partir de 2016, tendo em vista decisão judicial e o Acordo 001/2017 firmado entre as partes, o DNIT, juntamente com a URBEL, passaram a administrar os pagamentos diretamente. Assim, DNIT e URBEL receberam todos os instrumentos de contrato previamente celebrados e, dessa forma, assumiram eventuais passivos que existiam.

A gestão do pagamento dos aluguéis sociais evidenciou uma série de práticas que foram exitosas e outras que merecem ser discutidas e analisadas com vistas a serem evitadas na condução de futuros programas que adotem o benefício do aluguel social. Sendo assim, abaixo seguem as principais dificuldades enfrentadas ao

longo do acompanhamento do pagamento dos aluguéis sociais com sugestões de boas práticas a serem conduzidas na gestão de aluguéis sociais pelo DNIT.

A) TEMPO DECORRIDO ENTRE A SELAGEM E O REASSENTAMENTO

O Projeto de Reassentamento necessita de um bom planejamento inicial. É necessário tempo hábil para elaboração de estudos preliminares, plano de reassentamento e projetos de trabalho social, de modo a aferir a viabilidade da realização do projeto e os impactos na comunidade.

Mesmo com um bom planejamento, eventualmente, surgem imprevistos que culminam em medidas excepcionais, como o abrigo provisório de famílias em decorrência de eventuais riscos à população ou da necessidade de liberação de frentes de obra.

Outro fator que impacta o bom andamento dos programas de reassentamento é o lapso temporal decorrido entre a selagem e o reassentamento. Com o passar do tempo, diversas mudanças ocorrem na estrutura da comunidade e, desse modo, há defasagem das informações, tendo em vista mudança na composição das famílias, construção de novas edificações, alteração nas edificações cadastradas, surgimento de novos núcleos familiares, entre outros.

A selagem é procedimento por meio do qual se atribui marca identificadora na moradia quando do cadastramento técnico individual (DNIT, 2022). O procedimento tem a função de identificar a comunidade em um contexto temporal, espacial e social e congelar aquela realidade por meio de fotos e relatórios. Idealmente deve ocorrer quando há previsão concreta de realização do reassentamento definitivo, a fim de que o decurso do tempo não afete a eficácia dos reassentamentos.

Considerando que a selagem se deu entre 2014 e 2016 e os reassentamentos definitivos se deram entre 2017 e 2021, verifica-se que, em alguns casos, houve tempo suficiente para mudanças na composição familiar originária. Tal fato não impactou o valor dos aluguéis concedidos, mas, em determinados casos, impactou no custo do reassentamento definitivo, tendo em vista mudança de tipologia das unidades familiares. Para a conclusão do reassentamento dessas famílias, foi necessário realizar duas atualizações cadastrais, o que implica custos e mão de obra especializada.

Dessa forma, sugere-se que, nos programas de aluguel social, o tempo entre a selagem e o reassentamento definitivo seja o menor possível, a fim de se minimizar os impactos nos valores do aluguel e nos gastos extras com atualizações cadastrais para o reassentamento definitivo das famílias, tendo em vista mudança de tipologia das unidades familiares.

B) RECEBIMENTO DE PASSIVOS DOCUMENTAIS DA JUSTIÇA FEDERAL

O recebimento de passivos de uma situação jurídica, firmada anteriormente pela Justiça Federal e sobre a qual o DNIT não tinha gerência, dificultou o acompanhamento e a operacionalização do pagamento do aluguel social.

Entre os problemas identificados exemplificam-se: falta de padronização dos instrumentos de contratos celebrados; inconsistências formais como ausência de assinatura, divergência de informação bancária do locador, ausência de cláusulas essenciais; inconsistências materiais como valores superiores aos concedidos em audiência judicial, divergência de valores no mesmo instrumento e divergência de data de início do pagamento e da vigência do contrato.

Outro problema enfrentado na época refere-se à falta de informação acerca do último mês de pagamento pela Justiça Federal. Isso gerou dificuldade para compatibilizar o pagamento em relação ao seu mês de referência. Por exemplo: alguns contratos recebidos em outubro de 2016 já se encontravam com o mês de referência de outubro pago e outros não. Esse fato dificultou, em alguns casos, a gestão do pagamento dos aluguéis daquele momento em diante.

Desse modo, sugere-se que, nos programas de aluguel social, caso se recebam passivos de outros órgãos ou instituições na gestão dos aluguéis, seja solicitado relatório descritivo dos benefícios pagos até o momento.

C) ACOMPANHAMENTO *IN LOCO* DAS FAMÍLIAS

A ausência de acompanhamento regular *in loco* pode gerar prejuízos ao Programa, tendo em vista mudanças na composição familiar e, conseqüentemente, no valor do benefício a ser concedido.

Ressalta-se que esses pedidos de alteração de dados são esperados tendo em vista a longa duração desses contratos. No entanto, essas mudanças devem ser feitas por meio de aditivos contratuais, prezando-se pela adequada evidenciação dessas alterações nos termos do contrato.

A ausência de formalidade nas alterações contratuais pode comprometer a segurança jurídica dos referidos instrumentos e a transparência dos processos, além da possibilidade de apontamento de inconsistências em prestações de contas e eventuais auditorias.

Dessa forma, sugere-se que, nos programas de aluguel social, haja maior rigor no acompanhamento de alterações contratuais, formalizando-as por meio de aditivos ou instrumentos congêneres.

Além disso, a ausência de acompanhamento também pode gerar pagamentos indevidos de aluguel social, causados pela mudança da família sem prévio aviso ao gestor dos contratos. Por consequência, o benefício continua sendo pago mensalmente ao locador, ocasionando pagamento indevido do aluguel social.

Assim sendo, sugere-se que, nos programas de aluguel social, haja acompanhamento *in loco* periódico do benefício por equipe especializada e estruturada. Além disso, sugere-se que se inclua cláusula específica nos contratos de aluguel social, definindo que os locadores devem comunicar ao gestor do contrato casos de abandono do imóvel pelos beneficiários.

D) ALTERAÇÕES DOS INSTRUMENTOS DE CONTRATO

Durante o período de acompanhamento dos aluguéis sociais, verificou-se, em diversos casos, muitos pedidos de alteração de informações dos contratos de aluguel, como dados bancários dos locadores e período de referência do benefício.

E) PADRONIZAÇÃO DO INSTRUMENTO DE CONTRATO

A falta de padronização dos instrumentos de contrato de aluguel social também se destacou como um dificultador para a gestão dos pagamentos.

Esse problema pode gerar inconsistências nos contratos, como divergência de informação bancária do locador e ausência de assinaturas e de cláusulas essenciais. Além disso, pode gerar inconsistências materiais, como valores superiores ao firmado em acordo, incoerência de valores no mesmo instrumento e divergência entre a data de início do pagamento e a da vigência do contrato. Essas inconsistências podem comprometer a gestão do pagamento dos aluguéis, gerando pagamentos em duplicidade ou a falta deles.

A gestão dos pagamentos depende da comunicação da equipe de campo sobre a data de realização da mudança definitiva do beneficiário. O pagamento, por sua vez, depende de aviso prévio ao setor financeiro, tendo em vista o tempo requerido para o processamento da execução da despesa. Dessa forma, após a definição do reassentamento definitivo, é necessário acompanhamento do processo de mudança e de execução da despesa para evitar atraso no pagamento.

Com relação ao período ao qual se refere o aluguel social, deve haver padronização dos instrumentos do contrato sobre a data de pagamento, devendo constar que o pagamento será efetivado após o decurso do mês em que houve moradia. Ademais, deve ser padronizada a proporcionalidade do valor a ser pago nos casos em que o beneficiário se mudar antes de completar o período mensal, ou seja, deve ser definido se o pagamento do aluguel será proporcional ao número de dias em que houve moradia ou se o pagamento será integral.

Ressalta-se que, na Administração Pública, todas as despesas devem seguir os estágios preconizados na Lei nº 4.320/1964. O pagamento de despesas antecipadas, especificamente no caso de aluguéis sociais, deve ser evitado, tendo em vista que o fato gerador da despesa é o usufruto da moradia. No caso de haver antecipação, pode ocorrer pagamento indevido, a depender da data de mudança da família, o que pode gerar custos para a cobrança da devolução desses valores.

Portanto, sugere-se que, nos programas de aluguel social, haja maior rigor no acompanhamento das mudanças definitivas das famílias e no pagamento proporcional dos dias em que efetivamente houve moradia no mês. Além

disso, sugere-se padronização nos instrumentos de contrato, de forma que o pagamento seja realizado após o fato gerador da despesa, ou seja, após o usufruto, efetivamente, da moradia no mês.

F) EMPRESA RESPONSÁVEL PELA MUDANÇA X AUXÍLIO-MUDANÇA

Os primeiros reassentamentos definitivos realizados pelo Termo de Acordo 001/2017 começaram a ocorrer em dezembro de 2017 para as famílias que estavam inseridas no aluguel social. Nessa época, as mudanças eram realizadas por empresa vencedora de processo licitatório, em âmbito nacional.

Contrataram-se serviços comuns de transporte rodoviário de carga, em caminhão fechado tipo baú, compreendendo o transporte de bagagem (móveis, utensílios, vestuário, objetos e demais pertences).

O custo do serviço levava em consideração a distância e o volume da carga a ser transportada, incluídos no valor, entre outros, materiais especializados para embalagem, desembalagem, mão de obra especializada, frete, impostos e seguro.

Esse formato começou a apresentar alguns fatores dificultadores, como a não previsão de transporte de pessoas e animais, no contrato da licitada, e reclamações de avarias nos pertences transportados.

Dessa forma, propôs-se nova forma de se executar as mudanças dos beneficiários, com base na distância do deslocamento para a nova moradia e o volume de material transportado.

Após pesquisas de mercado, com empresas privadas e profissionais autônomos, obtiveram-se os seguintes resultados:

Tabela 1 – Pesquisa de mercado

Distância (km)	Volume (m³)	Preço (empresa)	Preço (autônomo)
≥ 40	< 40	R\$ 1.550,00	R\$ 600,00
	40 > x ≤ 50	R\$ 1.890,00	R\$ 750,00
	50 > x ≤ 60	R\$ 2.240,00	R\$ 900,00
	< 60	R\$ 2.680,00	R\$ 1.050,00
40 > x ≤ 50	< 40	R\$ 1.590,00	R\$ 650,00
	40 > x ≤ 50	R\$ 1.890,00	R\$ 800,00
	50 > x ≤ 60	R\$ 2.740,00	R\$ 1.050,00
	< 60	R\$ 3.260,00	R\$ 1.270,00
50 > x ≤ 60	< 40	R\$ 1.670,00	R\$ 700,00
	40 > x ≤ 50	R\$ 1.930,00	R\$ 850,00
	50 > x ≤ 60	R\$ 3.520,00	R\$ 1.350,00
	< 60	R\$ 3.810,00	R\$ 1.500,00
60 > x ≤ 100	< 60	R\$ 4.390,00	R\$ 1.800,00

Fonte: SREMG/DNIT e URBEL, em agosto de 2018

Com base no estudo realizado, foi proposto o valor de auxílio-mudança nos seguintes moldes:

Tabela 2 – Valores do benefício Auxílio-Mudança que passaram a ser adotados

Distância (km)	Tipologia	Valor
Até 40	2 quartos	R\$ 650,00
	3 quartos	R\$ 750,00
Até 50	2 quartos	R\$ 700,00
	3 quartos	R\$ 800,00
Até 60	2 quartos	R\$ 750,00
	3 quartos	R\$ 850,00
Até 100	2 quartos	R\$ 1.000,00
	3 quartos	R\$ 1.300,00

Nota: Quando a distância ultrapassa 100 Km, é acrescido R\$ 100,00 a cada 10 Km deslocados

Fonte: SERMG/DNIT e URBEL, em agosto de 2018

Nessa perspectiva, sugere-se que, nos programas de aluguel social, seja utilizada a modalidade do auxílio-mudança por representar maior economicidade e maior celeridade no processo de mudança. Além disso, reduz a necessidade da atuação do DNIT na solução de conflitos e permite maior autonomia às famílias, pois exercem protagonismo também no ato da mudança.

G) PRÉ-MORAR

A fase de pré-morar dos programas de remoção e reassentamento abrange o período desde o contato inicial com as comunidades até o momento da mudança para a nova moradia (DNIT, 2022). A concessão de aluguel social pode ocorrer em contextos de urgências, não sendo possível realizar o trabalho de conscientização das famílias em relação à manutenção dos

imóveis alugados, especificamente, a necessidade de conservação das moradias e pagamento de contas. Nesse contexto, podem ocorrer, em alguns casos, avarias nos imóveis causadas por beneficiários que não possuem condições para arcar com o conserto. Além disso, também pode haver casos de atraso no pagamento de contas (como água, energia etc.) por parte dos beneficiários.

Sendo assim, ressalta-se a importância das atividades pré-morar, a fim de conscientizar as famílias a conservar o imóvel nas mesmas condições em que receberam.

Outro fator fundamental a ser abordado na fase de pré-morar é a necessidade de pagamento tempestivo de todas as despesas correntes do imóvel, como água, luz, telefone, condomínio, entre outras.

Dessa forma, sugere-se que, nos programas de aluguel social, a equipe responsável pelo programa realize atividades de conscientização e educação patrimonial com as famílias antes de serem removidas da comunidade ou, em caso de urgência, durante o programa de aluguel social.

H) CONSIDERAÇÕES ACERCA DAS CRIAÇÕES DE ÓRGÃOS DELIBERATIVOS E PARTICIPATIVOS DE REASSENTAMENTO

No caso do programa Concilia BR-381 e Anel, os reassentamentos definitivos dependiam de avaliação e aprovação de cada um dos beneficiários pelo Conselho Executivo (COE) do programa Concilia. Por essa razão, as famílias que se encontravam no aluguel social permaneciam usufruindo do benefício até a deliberação definitiva do Conselho.

O COE foi instituído pelo Acordo Judicial nº 001/2017. Trata-se de órgão colegiado de caráter deliberativo e tem como principal objetivo:

[...] buscar o entendimento prévio das partes acerca das questões relacionadas à execução do programa, minimizando os litígios a serem equacionados na esfera judicial (BRASIL, 2017, p. 2).

O Conselho é composto por um representante de cada uma destas instituições: MPF, DPU, DNIT, URBEL e CMAR. O COE, entre outras competências, analisa os cadastrados dos beneficiários, verifica as condições de elegibilidade das famílias para o reassentamento definitivo e aprova as novas moradias das famílias.

Dada a sua natureza heterogênea, muitas vezes, as discussões se estendem, prolongando, dessa forma, o tempo de permanência das famílias nos aluguéis sociais.

Acrescente-se que o Acordo Judicial nº 001/2017 não definiu fluxo de trabalho do Conselho. Dessa forma, não houve mapeamento dos processos e detalhamento das ações que compõem o fluxo de reassentamento.

Além disso, o referido acordo não previu prazo máximo para que as famílias aprovassem os imóveis indicados à sua tipologia. Os critérios e regras que norteiam o programa previam, na verdade, que cada família poderia visitar até três imóveis e deveria optar por um deles, caso contrário, a família teria atendimento preterido (posicionada ao final da planilha de priorização).

A falta de definição de prazo, aliada à decisão de preterição das famílias que não optavam pelos imóveis apresentados, ocasionou longa permanência de algumas famílias no aluguel social, que resultou em uma estadia média de 38,9 meses e máxima de 89 meses.

Além disso, a delonga para conclusão dos trâmites entre Justiça Federal e agente bancário, visando à liberação dos recursos do auxílio-mudança e da aquisição do imóvel, também ocasionou morosidade na conclusão do aluguel social.

Portanto, sugere-se que nos próximos programas de aluguel social haja a definição de prazo máximo para famílias indicarem ou escolherem imóveis para o seu reassentamento definitivo. Ademais, caso seja viável, sugere-se que eventuais criações de órgãos deliberativos e participativos de reassentamento sejam bem avaliadas por parte do DNIT nos aspectos de viabilidade e da eficiência na condução dos reassentamentos.

I) CRITÉRIO DE DESTINAÇÃO DOS IMÓVEIS

As diretrizes dos programas de reassentamento constantes da publicação IPR-750/2022 (DNIT, 2022) estabelecem que se devem definir critérios de destinação dos imóveis adquiridos ou construídos segundo o perfil socioeconômico das famílias reassentadas.

A definição de critérios de destinação de imóveis faz parte do planejamento do programa de aluguel social e contribui para a eficácia desse. Quando se atende às necessidades de moradia das famílias, reduz-se o risco de evasão, evitando gastos desnecessários ao programa. Por exemplo, famílias que trabalham com coleta de materiais recicláveis ou exercem atividade econômica na moradia devem, na medida do possível, ser alocadas em imóvel que possa atender a essas necessidades, ainda que provisoriamente.

Assim, sugere-se que, nos programas de aluguel social, sejam definidos e implementados os critérios de destinação de imóveis, com base nas informações cadastrais das famílias, de maneira a atender às suas necessidades.

J) EDUCAÇÃO AMBIENTAL E REGRAS DE BOA CONVIVÊNCIA

Considerando a condição de vulnerabilidade socioeconômica de muitas das famílias, torna-se necessária a elaboração, o planejamento e a

execução de ações educativas voltadas à educação ambiental e às regras de boa convivência na nova moradia.

Essas orientações contribuem para a eficácia do programa, na medida em que se evitam problemas no novo território, como conflitos com a vizinhança, dispersão de zoonoses, descarte inadequado do lixo e má conservação do imóvel.

Dessa forma, deve-se orientar as famílias quanto ao uso adequado da rede de distribuição de água e coleta de esgoto. Além disso, deve-se orientar as famílias sobre cuidados no manejo de resíduos sólidos e orgânicos, tendo em vista questões de saúde pública e ambientais, como contaminação do solo e de mananciais e proliferação de zoonoses.

Por fim, é necessária a orientação das famílias quanto à importância de se preservar um ambiente de boa convivência e de bem-estar físico, mental e social.

Portanto, sugere-se que, nos programas de aluguel social, sejam definidas e implementadas ações educativas voltadas à abordagem da educação social, ambiental e patrimonial, visando conscientizar o beneficiário para uma nova realidade social.

5 CONCLUSÃO

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) possui a função institucional de implementar, em sua esfera de atuação, a política formulada para a administração da infraestrutura do Sistema Federal de Viação. Visando à liberação de áreas para execução das obras de infraestrutura de transporte, o DNIT pode realizar a remoção e o reassentamento de famílias impactadas.

O aluguel social é uma solução temporária de reassentamento e possui caráter excepcional. Com o planejamento adequado, o aluguel social pode contribuir para a desocupação tempestiva

das áreas de interesse da autarquia, evitando-se atrasos das obras e onerações excessivas decorrentes de atrasos.

Programas de aluguel social devem ser bem planejados, de maneira a evitar que percam seu caráter temporário e excepcional e acabem gerando situações de conflito entre o DNIT e os beneficiários.

É importante que todas as ações de reassentamento sejam executadas quando houver a perspectiva real de solução definitiva, pois a experiência mostra que as composições familiares são intrinsecamente dinâmicas, o que

pode gerar necessidade constante de atualização cadastral.

Sugere-se a padronização dos instrumentos de contrato e de regras para escolha dos imóveis definitivos, evitando-se tratamentos diferenciados e manutenção do benefício por longos períodos.

Por fim, o acompanhamento das famílias, com orientações sobre o uso e a conservação dos imóveis, bem como sobre as responsabilidades do pagamento de taxas e contas, contribui para o gerenciamento do programa, evitando-se problemas na devolução dos imóveis e atrasos na finalização do programa.

REFERÊNCIAS

BALBIM, R. **Serviço de Moradia Social ou Locação Social: alternativas à política habitacional**. Brasília, DF: IPEA, 2015 (Texto para discussão, n. 2134).

BRASIL. **Lei nº 4.320, de 17 de março de 1964**. Estatui Normas Gerais de Direito Financeiro para elaboração e controle dos orçamentos e balanços da União, dos Estados, dos Municípios e do Distrito Federal. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4320.htm. Acesso em: 5 maio 2023.

BRASIL. **Lei nº 8.245, de 18 de outubro de 1991**. Dispõe sobre as locações dos imóveis urbanos e os procedimentos a elas pertinentes. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8245compilado.htm. Acesso em: 5 maio 2023.

BRASIL. Tribunal Regional Federal (1. Região). **Termo de acordo nº 001/2017** (0057367.09.2013.4.01.3800). 7ª Vara Cível da Seção de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, abr. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Publicação IPR – 750: Diretrizes dos Programas de Reassentamento**. 1. ed. Brasília, DF, 2022. 232p.

VAMOS FALAR SOBRE ÉTICA PÚBLICA? PROJETO-PILOTO DESENVOLVIDO PELA COMISSÃO DE ÉTICA SETORIAL DO DNIT

LET'S TALK ABOUT PUBLIC ETHICS? PILOT PROJECT DEVELOPED BY THE SECTORAL ETHICS COMMITTEE OF DNIT

Rodilon Teixeira - rodilon.teixeira@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0000-0001-5920-6933>

Meire Cristina Cabral de Araújo Silva - meire.araujo@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0000-0002-7991-1397>

Clarissa de Sousa Miranda - clarissa.sousa@dnit.gov.br - <https://orcid.org/0000-0001-8522-721X>

RESUMO: O presente artigo tem como objetivo apresentar a ação implementada pela Comissão de Ética Setorial do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, que se propôs a reduzir o distanciamento entre a comissão e os agentes públicos, entre outras proposições. O estudo foi desenvolvido como artigo técnico em que é apresentada a solução desenvolvida pela Comissão de Ética, que consiste em um projeto-piloto denominado “Falando sobre ética...”, em que se teve em vista aperfeiçoar a atuação dessa comissão, realizando reuniões no ambiente de trabalho dos agentes de maneira informal. Os resultados do projeto demonstraram a importância de estabelecer espaços que aproximem os agentes públicos das reflexões e debates sobre a ética pública, além de ampliar e aperfeiçoar o trabalho da Comissão de Ética com uma ação simples, que demandou poucos recursos (financeiros e materiais) em seu desenvolvimento.

PALAVRAS-CHAVE: ética pública; administração pública; integridade; DNIT.

ABSTRACT: *This article aims to present the actions implemented by a sectoral ethics committee of the Department of National Transportation Infrastructure – DNIT, which aimed to reduce the distance between the committee and public agents, among other proposals. The study was developed as a technical article presenting the solution developed by the ethics committee through a pilot project called “Talking about Ethics...”. The project sought to improve the committee's performance by holding informal meetings with agents in their work environment. The project results demonstrated the importance of establishing spaces close to public agents for reflections and debates on public ethics. This simple action required minimal financial and material resources and successfully expanded and improved the ethics committee's work.*

KEYWORDS: public ethics; public administration; integrity; DNIT.

1 INTRODUÇÃO

A formalização e institucionalização da Ética Pública na administração pública brasileira teve sua origem na promulgação da Constituição Federal (Brasil, 1988). Essa ação surgiu

influenciada pela demanda de um cenário no qual os servidores públicos estavam desacreditados e sofriam questionamentos da população em relação aos aspectos morais e éticos da atuação funcional. Após três décadas da inserção formal

dos preceitos éticos na gestão pública, mantém-se premente e um desafio constante a busca por aperfeiçoar e orientar a conduta dos agentes públicos alinhados com tais princípios.

Entretanto, os preceitos éticos, por vezes, não são seguidos em sua íntegra ou não pautam a ação e atuação de todos os agentes públicos, que, geralmente, alegam desconhecimento, falta de orientação, ou, ainda, contam com a complacência da alta direção dos órgãos, que não atua para inibir comportamentos que contrariam a ética pública, ou em razão de dúvidas geradas em temas que também podem se aproximar das competências da atuação correicional. A atuação profissional desvinculada dos valores éticos exige um compromisso institucional que envolve a alta direção dos órgãos, auxiliada pela Comissão de Ética Setorial (local), que deve atuar constantemente nas funções de disseminação da ética pública e apuração de condutas, suas duas principais ações.

O presente artigo tem por objetivo apresentar um modelo de ação prática a ser utilizada pelas comissões de ética locais, que se propõe a divulgar e refletir sobre os preceitos éticos preconizados no ordenamento jurídico, além de realizar a aproximação entre os membros das comissões e os agentes públicos. O modelo, desenvolvido como projeto-piloto e aplicado no âmbito da sede do DNIT, em Brasília, pode ser utilizado e replicado em diversos tipos de instituições públicas, desde que promovidas as adaptações cabíveis em relação à legislação no caso de comissões que não estejam vinculadas ao Poder Executivo federal.

Este artigo foi desenvolvido como artigo técnico, tendo como base as concepções abordadas por Mattos (2013), além das orientações contidas na Revista de Administração Contemporânea (RAC, 2021).

Ao apresentar este trabalho empírico realizado no contexto do DNIT, foram observadas lacunas que dificultavam a atuação da Comissão de Ética local no sentido de ampliar a divulgação dos preceitos éticos, visando obter um alcance abrangente, bem como humanizar a atuação e conquistar a empatia e confiabilidade dos agentes públicos em relação ao trabalho da comissão. O detalhamento desse contexto da realidade analisada será apresentado na próxima seção.

2 A ÉTICA PÚBLICA NO PODER EXECUTIVO FEDERAL E SUAS RAMIFICAÇÕES NOS ÓRGÃOS PÚBLICOS

Os preceitos contidos na Constituição Federal (Brasil, 1988), na Lei nº 8.112/90, que é o estatuto dos servidores públicos federais (Brasil, 1990), e na Lei nº 8.429/92 (Brasil, 1992), que trata das sanções aplicáveis em virtude da prática de atos de improbidade administrativa, foram as bases legais que fundamentaram a gestão e a apuração ética nos órgãos e entidades no âmbito do Poder Executivo federal. Com isso, foi publicado o Decreto nº 1.171/94 (Brasil, 1994), que instituiu o Código de Ética Profissional do Servidor Público Civil do Poder Executivo Federal, bem como estabeleceu o dever de se criar comissões de ética em cada órgão e entidade da Administração Pública federal.

Dessa forma, as comissões de ética setoriais, que integram o Sistema de Gestão da Ética do Poder Executivo Federal, instituídas nos órgãos públicos federais, tiveram suas competências, atribuições e atuação orientadas, em especial, pelo Decreto nº 6.029/2007 (Brasil, 2007) e pela Resolução nº 10/2008, da Comissão de Ética Pública (Brasil, 2008).

O DNIT foi criado em 2002, mas recebeu como “herança” o patrimônio, os bens públicos e boa parte da equipe de servidores públicos do extinto Departamento Nacional de Estradas de

Rodagem –DNER. No período do estudo, o DNIT contava com o trabalho de cerca de 6.300 agentes públicos em todo o país, dos quais, aproximadamente, 650 se encontravam lotados na sede, em Brasília, local de implementação do projeto-piloto que será apresentado neste artigo.

Em 2005, foi instituída no DNIT a primeira Comissão de Ética e, também, foi criado o Código de Ética da autarquia. A composição da Comissão passou por alterações nos anos de 2006 e 2009. Entretanto, no período estimado entre os anos de 2012 e 2013, os membros dessa comissão deixaram de atuar nos trabalhos de disseminação da ética e de apuração das condutas, o que levou ao acúmulo de diversos processos contendo denúncias sobre a conduta ética de agentes públicos. A situação culminou em uma condenação na Justiça do Trabalho sofrida pelo DNIT, em 2014, em razão de assédio moral cometido por empregado público cedido para autarquia, que teve grande repercussão na mídia. Com isso, foi nomeada uma nova Comissão de Ética, que precisou analisar a referida denúncia, bem como reativar os trabalhos interrompidos pela comissão anterior.

Com base nas informações apresentadas sobre o contexto organizacional e sua relação com o Sistema de Gestão da Ética do Poder Executivo Federal, serão apresentados na próxima seção os aspectos sobre a situação-problema e as oportunidades que surgiram.

3 DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO-PROBLEMA E/OU OPORTUNIDADE

Conforme foi verificado anteriormente, a atuação da Comissão de Ética da autarquia estava descontinuada, sendo que um fato relacionado ao assédio moral desabonou a conduta de um agente público ocupante de cargo de chefia, maculando a imagem institucional do DNIT e da própria administração pública perante

a sociedade, o que foi agravado pela repercussão na mídia. Dessa forma, os membros da comissão nomeados em 2014 tinham pela frente um grande desafio: reestabelecer os trabalhos da comissão para a disseminação da ética num contexto em que ela estava desacreditada.

As análises e diagnósticos iniciais desse primeiro ano de atuação demonstraram a necessidade de ações que pudessem contemplar efetivamente todas as funções técnicas da Comissão de Ética, que sejam: educativa, consultiva, preventiva, conciliadora e repressiva (Brasil, 2007). Assim, no planejamento realizado para o ano seguinte, foi proposta maior ênfase no papel educativo, sem deixar de realizar as demais funções. Essa proposição vai ao encontro da proposição apresentada por Nunes (2018, p. 977), ao afirmar que “invocar o verdadeiro *ethos* significa debater a importância do bem público, da ação coletiva e da solidariedade política. As comissões de ética pública podem ser indutoras desse debate junto à sociedade”.

Além disso, em decorrência do planejamento e debates realizados no âmbito das reuniões da comissão, buscou-se também contextualizar as práticas e tipos de ações que poderiam ser mais efetivas e adequadas à realidade do órgão, bem como destacar a função educativa, e, conforme afirmam Mendes *et al.* (2014), a adoção sistemática de instrumentos pedagógicos para a promoção da ética contribui para o sucesso dessas comissões. Assim, foi elaborado o projeto “Falando sobre ética...”, que se apresentou como uma oportunidade para mudar o cenário observado anteriormente, buscando aproximar o trabalho da comissão ao cotidiano de trabalho dos agentes públicos, e, dessa forma, resgatar a confiabilidade da comissão.

Na seção seguinte serão apresentados os principais aspectos, informações e características

da ação realizada e caracterizada no presente trabalho.

4 ANÁLISE DA SITUAÇÃO-PROBLEMA E PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO

O projeto “Falando sobre ética...” surgiu da proposta de realizar uma atividade da Comissão de Ética do DNIT com o envolvimento direto dos agentes públicos, realizada no próprio ambiente de trabalho destes. A atividade foi planejada em um formato menos formal, pois julgou-se que isso poderia ser mais vantajoso e facilitar a consecução do objetivo proposto se comparado ao modelo tradicional de palestra expositiva, que, em geral, é realizada num auditório com um grupo maior de pessoas, em que os participantes apenas escutam a fala da Comissão de Ética e acabam por se sentir pouco à vontade para se manifestar.

Assim, definiu-se a realização de uma atividade não muito extensa, com previsão de transcorrer durante 30, 40 ou, no máximo, 50 minutos, que ocorreria no próprio ambiente físico de trabalho, onde o agente se sente mais à vontade. A atividade também deveria, sempre que possível, reunir o grupo de pessoas em um círculo, dispondo todos os presentes no mesmo nível, e ser realizada com pouca formalidade, de maneira mais descontraída, para falar sobre as competências e o funcionamento da comissão, bem como abordar aspectos de temas e assuntos relacionados à ética pública.

A proposta surgiu durante os debates entre os membros da comissão da autarquia na realização do planejamento das ações educacionais. Nesses encontros, os membros apresentavam ideias de ações e os eventuais problemas e/ou situações verificadas nos ambientes de trabalho da autarquia, almejando encontrar formas de amenizar ou solucionar tais problemas.

Havia a constatação de que as divulgações

realizadas por *e-mail* e pela *intranet* do órgão tinham limitações, visto que nem todos os prestadores de serviços (terceirizados) e estagiários possuíam correio eletrônico institucional. Aliado a isso, outra questão que justificou a escolha da atividade foi um aspecto da cultura organizacional, tendo em vista a disponibilização da informação de que diversos agentes públicos não tinham o costume de realizar diariamente a leitura das mensagens no correio eletrônico funcional, ou, ainda, a prática comum de alguns que criavam rotinas no aplicativo para desviarem determinadas mensagens, que não tinham interesse ou tempo para leitura, diretamente para a lixeira ou outra pasta.

Com isso, de maneira geral, ao idealizar o desenvolvimento desse projeto, os membros da Comissão de Ética tinham a expectativa de que os seguintes resultados poderiam ser alcançados: aproximar a atuação da comissão aos agentes públicos; humanizar a relação entre a comissão e os agentes; reduzir resistências para manter contato com a comissão; desmistificar a ideia — predominante no senso comum entre os agentes — de que a comissão tem apenas a função repressiva; divulgar as demais competências e macro funções técnicas (por exemplo, educação e disseminação de informações); e, por fim, reforçar a divulgação dos canais de comunicação e formas de acesso à comissão.

Na aplicação de um questionário durante as palestras e atividades da comissão no primeiro ano do mandato, bem como nos debates realizados, foi constatada a existência de situações que necessitavam de alguma forma de atuação da Comissão de Ética, a saber: (a) pouca divulgação dos canais de acesso à comissão; (b) desconhecimento das competências e forma de atuação da comissão;

(c) raras oportunidades e espaços para debater alguns temas polêmicos relacionados à ética pública, como, por exemplo, assédio moral e sexual, entre outros, e (d) distanciamento entre o trabalho realizado pela comissão e os agentes públicos da autarquia.

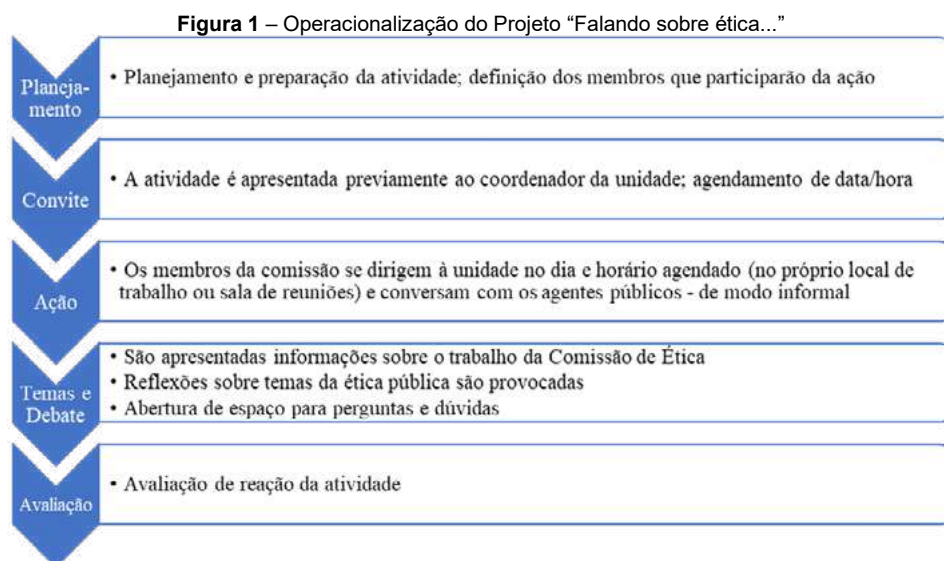
Assim, frente aos problemas diagnosticados, o projeto inicial foi concebido para alcançar os seguintes objetivos: (a) expandir o conhecimento dos agentes públicos sobre o trabalho realizado pela comissão, suas competências e a forma de atuação; (b) ampliar a divulgação dos canais de acesso à comissão; (c) criar um canal de comunicação entre os membros da comissão e agentes públicos, e, por fim, (d) aproximar a comissão dos agentes públicos da autarquia.

O público-alvo desta ação foram os agentes públicos, ou seja, os servidores, empregados públicos, os prestadores de serviço e os estagiários que atuavam nas Diretorias e Coordenações da sede da autarquia, em Brasília. O planejamento da atividade não previa a realização de comunicação ou divulgação prévia, apenas o contato direto da comissão com o gestor da unidade administrativa, apresentando a proposta e verificando a disponibilidade dessa

unidade em participar da ação, informando que a participação seria voluntária. Apenas após a realização da atividade é que ocorriam divulgações da ação na *intranet* da autarquia.

Durante o planejamento desse projeto, alguns obstáculos e dificuldades foram identificados, por exemplo, iniciar uma ação inovadora, sem modelos anteriores implementados, a incerteza sobre a receptividade dos participantes, o tempo de dedicação para preparação e participação dos membros da comissão na atividade, além de eventuais resistências de gestores.

Para a implementação do projeto, foram realizadas internamente parcerias com a unidade de comunicação, que auxiliou na elaboração de material físico de divulgação (panfletos, *folders* etc.) e, posteriormente, realizou ampla divulgação da iniciativa para o público interno. Também foi primordial para o sucesso do projeto a parceria com as próprias unidades de localização dos agentes, que se dispuseram a realizar uma breve pausa nas atividades laborais cotidianas para receber a comissão e realizar as reflexões. A operacionalização da ação é apresentada na Figura 1.



Fonte: Elaboração própria

Nas primeiras ações realizadas, já foram observados sinais positivos de que os resultados esperados seriam atingidos, pois houve boa participação dos agentes durante os encontros. Muitos apresentaram suas dúvidas, informaram que desconheciam o trabalho da Comissão de Ética da autarquia e que não sabiam quem eram os membros da comissão. Diversos prestadores de serviços (terceirizados) relataram desconhecer que a comissão também os abrangia.

A avaliação de reação da atividade, no primeiro momento do projeto, foi realizada por meio do preenchimento de formulário de pesquisa sobre o conhecimento da legislação sobre a ética. Nesse formulário, foi incluído um campo para os participantes expressarem sua opinião sobre a atividade realizada e falarem brevemente sobre sua percepção da ação. Contudo, em um momento posterior, após a realização da terceira atividade nas áreas, foi implementada uma avaliação de reação padronizada para verificar quantitativamente (em uma escala, Tipo Likert — variando de 0 a 5) a percepção dos participantes.

Durante o período de implementação dessa atividade, que se estendeu por cerca de seis meses, em formato de projeto-piloto, participaram dos encontros cerca de noventa agentes públicos. O que se observou foi o surgimento de um espaço para reflexões e debates sobre temas sensíveis no contexto do trabalho público, mas que precisavam ser conversados, de modo a esclarecer para todos os agentes a forma de enfrentamento das condutas que contrariam a ética pública.

Também foi observada nesse período a divulgação (informal) dessa ação entre os próprios agentes públicos, dado que começou a circular entre eles relatos e informações sobre a atividade, caracterizando-se como uma propaganda “boca a boca”, que sinalizava,

positivamente, sobre a execução da ação. Com isso, constatou-se que surgiram novas demandas por parte de diversas unidades pela realização de ações semelhantes em seu ambiente, além do reconhecimento por diversos gestores e agentes públicos da importância e efetividade dessa atividade, o que gerou, posteriormente, aumento no quantitativo de consultas, pedidos de informações e orientações à Comissão de Ética.

Por fim, o sucesso dessa prática foi evidenciado ao obter reconhecimento da Comissão de Ética Pública (CEP) da Presidência da República, no II Concurso “Boas Práticas na Gestão da Ética”, realizado em 2016, em que o projeto “Falando sobre ética...” foi premiado na categoria Administração Indireta. O concurso da CEP tem por objetivo destacar as ações desenvolvidas nos órgãos públicos federais, além de auxiliar na disseminação da ética e contribuir na prevenção de desvios de conduta.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONTRIBUIÇÃO SOCIAL

O presente artigo técnico teve como objetivo apresentar uma ação prática empregada pela Comissão de Ética Setorial do DNIT, cujo propósito foi provocar reflexões e disseminar entre os agentes públicos os preceitos éticos preconizados no ordenamento jurídico, em especial, no âmbito da sede dessa autarquia.

Os resultados dessa atividade, bem como a valorização destinada pelos agentes, que fizeram a propaganda “boca a boca” positiva sobre a atividade ao reconhecerem a existência dos caminhos e das formas para o enfrentamento das condutas que contrariam a ética pública. Observa-se que esse espaço possibilitou que os agentes públicos conhecessem e conversassem pessoalmente com os membros da Comissão de Ética, resultando em maior aproximação entre esses atores e deixando-os mais à vontade para

procurar posteriormente a comissão.

Assim, compreende-se que se trata de uma prática com bons resultados, que pode ampliar e aperfeiçoar o trabalho das comissões de ética, motivo pelo qual se sugere sua replicação em outras entidades, desde que promovidas as devidas adaptações ao contexto de cada instituição. Trata-se de uma atividade simples de ser desenvolvida, que necessita de pouco investimento de recursos materiais e financeiros, mas que representa uma oportunidade de ampliar o debate sobre o tema da ética e, em especial, inserida no cotidiano do trabalho.

A atividade se deu em um formato simples e informal, desenvolvido quase como um bate-papo entre colegas, mas diferenciando-se por ocorrer mediado pelos membros da comissão. Estes podiam ouvir diretamente dos agentes as situações cotidianas e analisar casos que

poderiam macular a ética pública, ou ainda, orientar e esclarecer eventuais dúvidas sobre o tema.

Em suma, entende-se que se trata de um grande desafio ter a ética pública efetivamente inserida e capilarizada nas diversas atividades desempenhadas pelos órgãos públicos, permeando suas atuações, que sofrem influência da conduta de seus agentes públicos. Assim, conforme defende Matias-Pereira (2007), implementar e efetivamente realizar a promoção da ética não é tarefa simples. Com isso, compreende-se que o emprego dessa atividade, objeto deste trabalho, ao ser replicado em outras instituições, poderá contribuir para o aperfeiçoamento do desempenho institucional dos órgãos públicos e qualificar os agentes públicos para melhor prestarem seus serviços à sociedade.

REFERÊNCIAS

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidente da República. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 27 set. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 1.171, de 22 de junho de 1994**. Aprova o Código de Ética Profissional do Servidor Público Civil do Poder Executivo Federal. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D1171.htm. Acesso em: 27 set. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 6.029, de 1º de fevereiro de 2007**. Dispõe sobre a estrutura regimental e o quadro demonstrativo dos cargos em comissão e das funções de confiança do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, e dá outras providências. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/decreto/d6029.htm. Acesso em: 27 set. 2022.

BRASIL. **Lei nº 8.429, de 2 de junho de 1992**. Dispõe sobre as sanções aplicáveis aos agentes públicos nos casos de enriquecimento ilícito no exercício de mandato, cargo, emprego ou função da administração pública direta, indireta ou fundacional e dá outras providências. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8429.htm. Acesso em: 27 set. 2022.

BRASIL. **Lei nº 8.112, de 11 de dezembro de 1990**. Dispõe sobre o regime jurídico dos servidores públicos civis da União, das autarquias e das fundações públicas federais. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L8112cons.htm. Acesso em: 27 set. 2022.

BRASIL. Comissão de Ética Pública. **Resolução nº 10, de 29 de setembro de 2008**. Dispõe sobre a vedação do nepotismo no âmbito da administração pública federal. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.etica.gov.br/resolucoes/10.pdf>. Acesso em: 27 set. 2022.

MATIAS-PEREIRA, J. **Manual de gestão pública contemporânea**. 1. ed. São Paulo, SP, Atlas, 2007.

MATTOS, P. L. C. L. de. "TAC – Tecnologias de Administração e Contabilidade: uma contribuição à sua discussão básica". **Tecnologias de Administração e Contabilidade (TAC - ANPAD)**, v. 3, n. 2, p. 168–189, 2013.

MENDES, A. V. C., JÚNIOR, H. de A., DA LUZ, R. P., *et al.* "Comissão de ética setorial: os desafios de fazer cumprir a ética na administração pública federal". **Revista do Serviço Público**, v. 61, n. 2, p. 137–156, 2014. DOI: 10.21874/rsp.v61i2.42.

NUNES, L. H. M. "O controle e a punição salvarão a ética pública?". **Revista da CGU**, v. 10, n. 17, p. 961–979, 2018.

RAC. Diretrizes para Publicação. **Revista de Administração Contemporânea (RAC)**, 2021. Disponível em: https://stperiodicos.blob.core.windows.net/rac/Diretrizes_Publicacao_2021_3_PT.pdf. Acesso em: 4 jul. 2022