



Revista

PAVIMENTAÇÃO

Ano XVIII - n° 53 - 2024 - www.abpv.org.br - www.revistapavimentacao.org.br - ISSN 1809-1865

**Avaliação da interação
agregado-ligante e o efeito
de biomateriais como
modificadores asfálticos**



ABPv

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO

SEDE

Rua Miguel Couto, nº 105,
Sobrelojas 4 e 5 - Centro
RIO DE JANEIRO - RJ
CEP.: 20070-030
(21) 2233-2020

Site: www.abpv.org.br
E-mail: abpv@abpv.org.br

Redes sociais:

instagram@abpv_br
facebook.ABPv1959
Linkedin: AssocBrasPavimentacao

Conselho Editorial

Diretoria da ABPv

Editora-Chefe

Arqta. Georgina Libório Azevedo Braga
georgina@abpv.org.br
MTb 31365-RJ

Arte e Edição

Jornalista Ivan da Costa
Ivandac@gmail.com
MTb RH 10819

Foto da CAPA:
Igor Alecsander

36ª DIRETORIA

Triênio 2023-2025

Diretora-Presidente

Engª. Luciana Nogueira Dantas

Diretor Vice-Presidente

Eng. Cássio Alberto Teoro do Carmo

Diretora Administrativa

Arqta. Georgina Libório Azevedo Braga

Diretor Financeiro

Eng. João Vicente Falabella Fabrício

Diretor Técnico

Eng. Lélío Antônio Teixeira Brito

Diretor de Divulgação

Eng. Rafael Lopes Martins

CONSELHO FISCAL

Sócio Coletivo

Maccaferri América Latina
Nouryon Ltda.

Sócio Individual

Eng. Cristiano Costa Moreira
Eng. Oswaldo Tuchumantel Júnior



NOSSA CAPA
A imagem que ilustra a
capa desta edição é da
Arqª Georgina Azevedo
Braga. Envie sua foto para
abpv@abpv.org.br

Sumário

- 5 49ª RAPv / 26º ENACOR / 5ª ExpoEnacorRAPv: DESTAQUE EM ARACAJU/SE
- 9 3º SIREMA - SIMPÓSIO DE RECICLAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS: A SUSTENTABILIDADE EM EVIDÊNCIA
- 11 ANÁLISE REOLÓGICA DO ENVELHECIMENTO EM LIGANTES ASFÁLTICOS: PERSPECTIVAS E DESAFIOS
 - Alexis Jair Enríquez-León, Marcos Lamha Rocha, Leni Figueiredo Mathias Leite, Luciana Nogueira Dantas, Francisco Thiago Sacramento Aragão
- 25 AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO AGREGADO-LIGANTE E O EFEITO DE BIOMATERIAIS COMO MODIFICADORES ASFÁLTICOS
 - Haline Dugolin Ceccato, Jéssica da Silva Vieira, Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Luciano Pivoto Specht, Andréa Valli Nummer
- 37 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO PREVISTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO NORDESTE BRASILEIRO QUANTO À FADIGA COM O USO DO MEDINA
 - Arthur Veras Moreira, Iuri Sidney Bessa, Beatriz Chagas Silva Gouveia, Juceline Batista dos Santos Bastos, Jorge Barbosa Soares
- 49 ESTADUALIZAÇÃO DE VICINAIS: GERAÇÃO DE UM INDICADOR ESPACIAL DE FAVORABILIDADE DE TRECHOS DE RODOVIAS MUNICIPAIS
 - Vinicius do Prado Capanema, Rafael Grinberg Chasles, Matheus Amaral Prates, Gean Kenid Sifronio Franco, José Luiz Fuzaro Rodrigues, Carolina Iris Brasil Mariano, Bruna Donegá Alves, Daniel Matos, Anderson Barbosa Esteves
- 63 USO DE EMULSÃO ASFÁLTICA NA REDUÇÃO DA POROSIDADE DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO
 - Verônica Janaína Melo Barreto Nunes, Fernando Silva Albuquerque

É com imenso entusiasmo que a ABPv apresenta a 53ª edição da Revista Pavimentação. Esta edição é especialmente significativa, pois os artigos selecionados têm origem em trabalhos submetidos à 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), realizada em Aracaju/SE, evento que reafirma a vitalidade técnica da comunidade pavimentadora nacional. A comissão editorial celebra a qualidade das contribuições e reforça a importância da revista como canal permanente de divulgação e valorização da pesquisa e da prática em pavimentação no Brasil.

**Lélio Antônio Teixeira Brito,
Georgina Libório Azevedo Braga,
Luciana Nogueira Dantas,
Cássio Alberto Teoro do Carmo,
João Vicente Falabella Fabrício e
Rafael Lopes Martins**

Editores da REVISTA PAVIMENTAÇÃO



EVENTOS



2024 - UM ANO DE INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE NA PAVIMENTAÇÃO BRASILEIRA

49^a RAPv / 26^o ENACOR / 5^a ExpoEnacorRAPv: Destaque em Aracaju/SE



Entre os dias 19 e 22 de agosto, Aracaju (SE) sediou a 49^a Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), o 26^o Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) e a 5^a ExpoEnacorRAPv. Com o apoio do Departamento de Estradas de Rodagem de Sergipe (DER/SE), o evento reafirmou seu papel como o principal fórum de discussões técnicas, políticas e de gestão em áreas estratégicas como pavimentação, ferrovias, aeroportos, projetos, gerenciamento de pavimentos, logística e segurança viária.

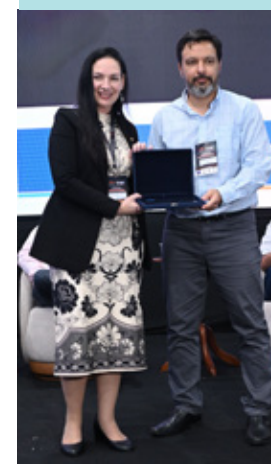
A 5^a ExpoEnacorRAPv consolidou-se como um espaço essencial para a apresentação de tecnologias de ponta, produtos inovadores e soluções que contribuem para a modernização da infraestrutura nacional. O evento proporcionou oportunidades de qualificação, networking e troca de experiências entre profissionais, pesquisadores, estudantes e empresas do setor.

Durante o RAPv/ENACOR, foram realizadas:

- 22 palestras
- 4 minicursos
- 3 mesas-redondas

O ano de 2024 consolidou-se como um período de intensa atividade e avanços significativos para o setor de pavimentação e infraestrutura de transportes no Brasil. A Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv) e a Associação Brasileira dos Departamentos Estaduais de Estradas de Rodagem (ABDER), em parceria com instituições de destaque, realizaram mais uma edição do RAPv/ENACOR — evento de grande relevância que reuniu cerca de 2.000 participantes e impulsionou o debate sobre tendências, inovações tecnológicas e sustentabilidade no setor.

Homenageados com o Prêmio Engenheiro Mario Kabalem Restom



Hiratan Pinheiro Silva



Oswaldo Tuchumantel



Antonio Guimarães



Joelson Hora Costa



João Falabella Fabrício



- Apresentação de 117 trabalhos técnico-científicos e estudos de caso de obras realizadas em diferentes estados do país
- Visitas técnicas à Usina Termelétrica da Eneva, à Ponte Construtor João Alves e à Rodovia SE-100 Norte

Um dos destaques do evento foi a entrega do tradicional Prêmio Engenheiro Mario Kabalem Restom, que homenageou profissionais com notável contribuição para o avanço da engenharia de pavimentação no Brasil:

- Eng.º Antônio Carlos Rodrigues Magalhães
- Eng.º Hiratan Pinheiro da Silva
- Eng.º João Vicente Falabella Fabrício
- Eng.º Joelson Hora Costa
- Eng.º Osvaldo Tuchumantel Júnior

Patrocinadores

Petrobras, DNIT, Ministério dos Transportes, Governo Federal, Strata Engenharia, Mútua, Softplan Setor Público, ARRB, Lisy Segurança Viária,

SINASC, Vimaster, Stratura, Traçado, DER-SP, DER-MG, Governo de Minas Gerais, Avery Dennison, Altanoroeste, Betunel, Dynatest, infraTest, CPE Tecnologia, IC Infraconsult, Simemp, RoadRunner, Betar, Huesker, Shempo, ABCP, ACO, Baseforte, Engefoto, Engemap, Estratégica, Geobruigg, Greca, IMB, Indutil Tintas, Labor Engenharia, Maccaferri, Pavesys, Renova Urb, Sinales, Safe Life – Viaencosta, TPF Engenharia, Technomast, XCMG, Dow

Apoio Institucional

EB Infra, CREA-SE, Aneor, Enecon, Serpro, Metalogalva Brasil, Sinalvip, World Bank Group, Rodovias&Vias, Paving Expo 2024, Coopertalse

Entidades Apoiadoras

ABSeV, ABNT, IGS Brasil, UFRGS, Inpotran, Centro Rodoferroviário Português, ABEDA, ABEE-TRANS

Capacitação Online Continuada

Ao longo de 2024, a ABPv reforçou seu compromisso com a qualificação profissional, promovendo uma série de atividades online que abordaram temas técnicos relevantes para o setor. Entre as principais ações destacam-se:

- Superpave: Caracterização de Materiais e Dosagem – 05/03/2024
- Pavimentação Ferroviária – 09 a 11/04/2024
- Implicações das Mudanças Climáticas no Desempenho de Pavimentos a Longo Prazo – 15/05/2024
- Microrrevestimento Asfáltico a Frio: Conceitos e Cuidados na Execução – 26/09/2024



3º SIREMA – Simpósio de Reciclagem de Misturas Asfálticas: A Sustentabilidade em Evidência



Em consonância com os princípios da economia circular e da sustentabilidade, a ABPv, em colaboração com a Escola de Engenharia de São Carlos da USP (EESC-USP) e a Escola Politécnica da USP (POLI-USP), realizou o 3º Simpósio de Reciclagem de Misturas Asfálticas (SIREMA), entre 26 e 29 de novembro de 2024, no campus da EESC-USP.

O simpósio teve como objetivo principal estimular práticas de reciclagem de misturas asfálticas, proporcionando uma abordagem abrangente sobre os desafios e avanços nesta área. A reciclagem foi destacada não apenas como uma necessidade ambiental, mas também como uma estratégia técnica e econômica para a construção civil. Considerando o elevado custo e a durabilidade limitada das misturas asfálticas, a reutilização torna-se um componente essencial para a sustentabilidade do setor e a disseminação de técnicas mais eficientes. Houve

visita técnica à Usina de Asfalto Eixo-SP.

Nesta edição, o Prêmio Engenheiro Mario Kabalem Restom foi concedido a profissionais cujas contribuições refletem o compromisso com a inovação e o desenvolvimento sustentável, dentre eles:





- Eng.º Paulo Romeu Assunção Gontijo – Strata Engenharia
- Eng.º Alexandre Benetti Parreira – EESC-USP
- Eng.º Glauco Túlio Pessa Fabri – EESC-USP
- Eng.ª Kamilla Vasconcelos Savasini – POLI-USP
- Eng.ª Liedi Légi Bariani Bernucci – POLI-USP

Para abrilhantar o evento e aproximar ainda mais os participantes foi oferecido um jantar de confraternização no The Palace Eventos em São Carlos.

Encerramento

O conjunto de eventos, iniciativas e programas desenvolvidos pela ABPv em 2024 reafirma o compromisso da entidade e de seus parceiros em promover uma infraestrutura de transportes moderna, eficiente, resiliente e alinhada aos princípios da inovação e da sustentabilidade, consolidando o Brasil como referência no desenvolvimento tecnológico e sustentável da pavimentação.



ANÁLISE REOLÓGICA DO ENVELHECIMENTO EM LIGANTES ASFÁLTICOS: PERSPECTIVAS E DESAFIOS

Alexis Jair Enríquez-León¹
 Marcos Lamha Rocha¹
 Leni Figueiredo Mathias Leite¹
 Luciana Nogueira Dantas²
 Francisco Thiago Sacramento Aragão¹

¹ Programa de Engenharia Civil, PEC/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, aenriquez.eng@gmail.com, marcoslr94@gmail.com, lenimathias@coc.ufrj.br, fthiago@coc.ufrj.br

² Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DF, Brasil, luciana.nogueira@dnit.gov.br

DOI: 10.21536/abpv.v53.1

RESUMO

Este estudo investigou os efeitos do envelhecimento em ligantes asfálticos, focando na alteração das propriedades viscoelásticas lineares e no impacto da modificação por polímeros (AMPs) e borracha (AMBs), bem como na avaliação em asfaltos não modificados (ANMs). A pesquisa utilizou os ensaios Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) e Pressure Aging Vessel (PAV) para simular condições de envelhecimento a curto e longo prazos, respectivamente, analisando os ligantes asfálticos em termos de resistência ao envelhecimento. Índices reológicos como ΔT_c , parâmetro GR, R (9-59), valor R, ω_c , parâmetros BTSV, módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase a 15°C e 10 Hz foram medidos para determinar a influência do envelhecimento nas propriedades dos ligantes. Os resultados indicaram que os processos de envelhecimento aumentaram a rigidez dos ligantes, diminuíram o seu ângulo de fase e impactam negativamente a resistência à fadiga. O estudo também destacou a importância de avaliar a suscetibilidade ao trincamento térmico utilizando o ΔT_c , além da influência de modificadores dos ligantes frente ao envelhecimento. Os parâmetros BTSV foram particularmente relevantes para distinguir os ligantes ANMs dos AMBs e AMPs, sugerindo seu potencial como critério classificatório na seleção dos materiais. Ademais, a análise pelo diagrama do espaço Black sugeriu a necessidade de ajustar os limites reológicos para refletir melhor a realidade dos ligantes brasileiros, combinando laboratório e avaliações em campo para uma caracterização mais precisa e adaptada dos materiais.

PALAVRAS-CHAVE: envelhecimento; ligante asfáltico; parâmetro GR; índices reológicos.

ABSTRACT

This study investigated the effects of aging on asphalt binders, focusing on changes in linear viscoelastic properties and the impact of modifications by polymers (AMPs) and rubber (AMBs), as well as evaluations on unmodified asphalts (ANMs). The research utilized the Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) and the Pressure Aging Vessel (PAV) to simulate short-term and long-term aging conditions, respectively, analyzing asphalt binders in terms of aging resistance. Rheological indexes such as ΔT_c , GR parameter, R (9-59), R-value, ω_c , BTSV parameters, dynamic shear modulus, and phase angle at 15°C and 10 Hz were measured to determine the influence of aging on the properties of the binders. The results indicated that aging processes increased the stiffness of the binders, reduced their phase angle, and negatively impacted their fatigue resistance. The study also highlighted the importance of assessing thermal cracking susceptibility using ΔT_c and the influence of binder modifiers on aging. The BTSV parameters were particularly relevant to distinguish ANMs, AMBs, and AMPs binders, suggesting its potential as a classification criterion in binder selection. Moreover, the Black space diagram analysis suggested the need to adjust rheological limits to reflect better the reality of Brazilian binders, combining laboratory and field evaluations for a more accurate and adapted characterization of the materials.

KEY WORDS: Aging; asphalt binder; GR parameter; rheological indexes.

INTRODUÇÃO

O envelhecimento dos ligantes asfálticos representa uma das principais causas de degradação dos pavimentos, influenciando diretamente a durabilidade e o desempenho das estruturas viárias. Esse processo, caracterizado principalmente pela oxidação e perda de voláteis durante a vida útil do pavimento, afeta as características viscoelásticas dos ligantes, comprometendo a resistência à fadiga e à deformação permanente das misturas asfálticas. Estudos como WWos de Anderson; Christensen e Bahia (1991), e Bahia e Anderson (1995), destacam que o envelhecimento, apesar de ser um fator ligado à durabilidade, não é diretamente um mecanismo de ruptura, mas influencia significativamente o comportamento do pavimento sob a ação de cargas.

A evolução dos procedimentos de envelhecimento em laboratório, particularmente a estufa Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) para simular o envelhecimento a curto prazo durante a usinagem e a compactação, e o vaso Pressure Aging Vessel (PAV), para simular o envelhecimento a longo prazo, reflete a complexidade do comportamento dos ligantes sob diferentes condições operacionais (ANDERSON; KENNEDY, 1993). Estes ensaios são essenciais para a previsão da vida útil dos pavimentos e para a avaliação da eficácia das modificações dos ligantes nos asfaltos modificados por polímeros e borracha, em resistir ao envelhecimento.

O programa SHRP (Strategic Highway Research Program) já indicava a necessidade de controlar o efeito do envelhecimento sobre a rigidez e a dependência da temperatura por meio de parâmetros reológicos diretos, como o módulo de cisalhamento dinâmico (ANDERSON; CHRISTENSEN; BAHIA, 1991). A complexidade inerente ao comportamento dos diferentes tipos de ligantes asfálticos frente ao envelhecimento exige uma investigação detalhada, que permita não apenas entender, mas também prever e mitigar os efeitos adversos deste fenômeno.

Estudos recentes exploraram os efeitos do envelhecimento em ligantes asfálticos, incluindo mudanças na estrutura química, propriedades reológicas e o impacto dos modificadores na resistência ao

envelhecimento (LI et al., 2019, NOTANI et al., 2020, LI; WANG, 2023). Modificadores como negro de fumo e carvão vegetal têm sido estudados por seu potencial para melhorar a resistência ao envelhecimento dos ligantes asfálticos (DONG et al., 2020, NOTANI et al., 2020).

A avaliação do envelhecimento dos ligantes asfálticos tem se concentrado em seu impacto nas propriedades mecânicas e durabilidade das misturas asfálticas (PAN et al., 2018). O envelhecimento do ligante asfáltico pode levar a mudanças nas propriedades mecânicas e físico-químicas, potencialmente causando trincas prematuras nos pavimentos asfálticos (KOYUN et al., 2020). Entender os mecanismos de envelhecimento e desenvolver estratégias eficazes de rejuvenescimento são fundamentais para manter o desempenho de longo prazo dos pavimentos asfálticos.

Nesse contexto, este estudo busca preencher lacunas ao investigar ligantes asfálticos sob diversas condições de envelhecimento, fornecendo uma análise comparativa entre asfaltos não modificados e modificados por borracha e polímero. Por meio de uma série de ensaios reológicos que examinam a resposta dos ligantes com diferentes índices, este trabalho pretende identificar os ligantes que demonstram maior resistência e estabilidade reológica frente ao envelhecimento, contribuindo para a seleção de materiais mais adequados à construção e manutenção de pavimentos duráveis e de alto desempenho.

MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação reológica envolveu a análise de 19 ligantes asfálticos do Termo de Execução Descentralizada (TED) 680/2020, celebrado entre o DNIT e a COPPE/UFRJ. Os ligantes foram categorizados em três grupos: Asfaltos não Modificados (ANMs), Asfaltos Modificados por Borracha (AMBs) e Asfaltos Modificados por Polímero (AMPs). Entre os ANMs, foram analisados seis Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) das classes PEN 30/45 e 50/70. Para os AMBs, foram avaliados ligantes das categorias AB-08 e AB-22. Por sua vez, o grupo dos AMPs englobou uma gama mais ampla, com tipos como 55/75, 60/85, 65/90, além de um ligante altamente modificado (HiMA) e um asfalto russo, explorando desde formulações convencionais até materiais com desempenho superior.

Os ensaios foram realizados utilizando um reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer*, DSR), conforme a norma ASTM D7175 (2023). Para explorar a resistência ao envelhecimento, os ligantes foram ensaiados em três condições: virgem, após envelhecimento a curto prazo utilizando o RTFOT, segundo a ASTM D2872 (2019), e após envelhecimento a longo prazo, que combinou o processo RTFOT seguido do PAV, conforme a ASTM D6521 (2019), sendo nomeado neste trabalho de RTFOT+PAV. Essa metodologia tripartida proporciona informações ricas sobre as mudanças nas propriedades dos ligantes sob diferentes regimes de envelhecimento. A Tabela 1 fornece informações da nomenclatura adotada para os materiais, assim como o tipo, a classe, o grau PG e o grau PG contínuo de alta temperatura (PGC).

Tabela 1. Características e nomenclaturas dos ligantes avaliados

Nomenclatura	Tipo	Classe	Grau PG	PGC
A	Não modificados	30/45	64S-16	68,9
B			64S-16	68,5
C			70S-16	71,6
D		50/70	58S-16	63,3
E			64S-22	66,4
F			64S-22	65,2
G	Modificados por borracha	AB-08	76S-22	78,8
H			76S-22	81,4
I			76S-22	77,5
J		AB-22	82S-28	82,3
K			82S-28	85,6
L			82S-28	87,5
M	Modificados por polímero	55/75	76E-22	76,4
N			64V-22	64,4
O		60/85	70H-22	72,4
P			70H-22	74,7
Q		65/90	70E-22	75,3
R		HiMA	82E-22	86,7
S		Russo	82S-22	85,5

No estudo, foram realizados diversos ensaios para examinar o comportamento dos ligantes sob condições de envelhecimento, avaliando a resposta viscoelástica em diversas temperaturas e frequências. Foram conduzidos ensaios de varredura de deformação, fundamentais para a determinação dos índices reológicos dentro da faixa de viscoelasticidade linear (Linear Viscoelasticity, LVE), que precederam à obtenção das curvas mestras na temperatura de referência de 25°C. Os ensaios de varredura de frequência foram realizados a 5°C, 15°C, 25°C, 35°C, 45°C, 55°C e 65°C, com frequências variando entre 0,01 Hz e 25 Hz.

Os índices reológicos LVE foram determinados por meio das curvas mestras, incluindo o parâmetro *Glover-Rowe*, GR, conforme a Equação 1, que correlaciona $|G^*|$ e δ no espaço *Black*, obtidos na frequência de 0,005 rad/s, ou seja, 0,0008 Hz, e na temperatura de 15°C, sendo um indicativo da resistência ao envelhecimento e da propensão ao trincamento do ligante (GLOVER *et al.*, 2005).

$$GR = \frac{|G^*|(\cos\delta)^2}{\sin\delta} \tag{1}$$

O valor R e a frequência angular de *crossover* ωc foram calculados. O valor R representa a diferença entre os logaritmos dos módulos de cisalhamento vítreo, G_g , e de *crossover*, G_c , na frequência de *crossover*. Valores maiores de R e menores de ωc indicam uma maior rigidez e vulnerabilidade ao envelhecimento (ANDERSON *et al.*, 2011). Além disso, foram avaliados os índices $|G^*|$ e δ a 15°C e a 10 Hz, conforme estabelecido na normativa europeia e utilizado na Espanha e na Inglaterra (EM 14770, 2023).

O índice alemão BTSV (ensaio rápido de caracterização de ligantes, em tradução do alemão para o português) (SCHRADER *et al.*, 2020) determina a temperatura de iso-módulo correspondente a $|G^*| = 15$ kPa, sendo um indicativo do comportamento do ligante em altas temperaturas. Segundo Schrader *et al.* (2020), o comportamento reológico de qualquer ligante a alta temperatura é precisamente caracterizado.

Os índices R (9-59) e ΔT_c foram avaliados para compreender a suscetibilidade ao dano por enve-

lhecimento dos ligantes asfálticos. O índice R (9-59), segundo o NCHRP 9-59 (2022), é utilizado para prever a resistência à fadiga dos ligantes. Este valor é obtido a partir do modelo de Christensen-Anderson (CHRISTENSEN; ANDERSON, 1992) e varia de 1,5 a 2,5, considerado adequado para garantir uma boa resistência à fadiga. O R (9-59) é calculado com base no módulo de rigidez (S) a 60 segundos e na taxa de relaxamento (m) a 60 segundos, usando a Equação 2.

$$R(9-59) = \log(2) * \frac{\log(S/3.000)}{\log(1 - m)} \tag{2}$$

Por sua vez, o ΔT_c é um indicador de suscetibilidade ao trincamento térmico em baixas temperaturas (ROWE, 2011), representando a diferença entre a temperatura crítica na qual o módulo de rigidez (S) alcança 300 MPa ($T_{crítica,s}$) e a temperatura na qual a taxa de relaxação (m) atinge 0,300 ($T_{crítica,m}$). Este índice, portanto, não é diretamente um indicador de fadiga, mas sim de vulnerabilidade térmica dos ligantes.

Índices de dano foram avaliados por meio do FFL (Fator de Fadiga de Ligante), obtido a partir do ensaio Linear Amplitude Sweep (LAS) e do Jnr3,2 a 64°C, do ensaio Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR), visando aprofundar o entendimento dos efeitos do envelhecimento nos ligantes asfálticos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, que apresenta os resultados do ΔT_c para os ligantes asfálticos estudados, notou-se uma variabilidade significativa que refletiu as distintas características de cada material. O ΔT_c atua como um indicador da suscetibilidade ao trincamento térmico e, portanto, é um elemento na avaliação de desempenho dos ligantes em condições de baixas temperaturas (ROWE, 2016).

Para os ligantes ANMs, a maioria dos valores de ΔT_c se manteve dentro de um espectro que não ultrapassa o limiar crítico de -2,5°C. No entanto, o ligante E apresentou ΔT_c de -5,08°C, evidenciando o efeito do tipo de petróleo e do processo de produção nas propriedades de baixa temperatura com

maior propensão ao trincamento térmico (ANDERSON *et al.*, 2011). Em contraste, os ligantes AMBs superaram frequentemente o limiar de $-2,5^{\circ}\text{C}$ e $-5,0^{\circ}\text{C}$, especialmente os ligantes G, H, K e L, com menores valores, apontando para limite potencial das modificações por borracha contra o trincamento em baixas temperaturas para os materiais

avaliados. Os AMPs apresentaram homogeneidade em seu comportamento, mantendo-se majoritariamente acima do limiar de $-2,5^{\circ}\text{C}$, como evidenciado por Rowe (2016). No entanto, o ligante S se sobressaiu com ΔT_c de $-14,72^{\circ}\text{C}$, revelando sua alta suscetibilidade ao trincamento.

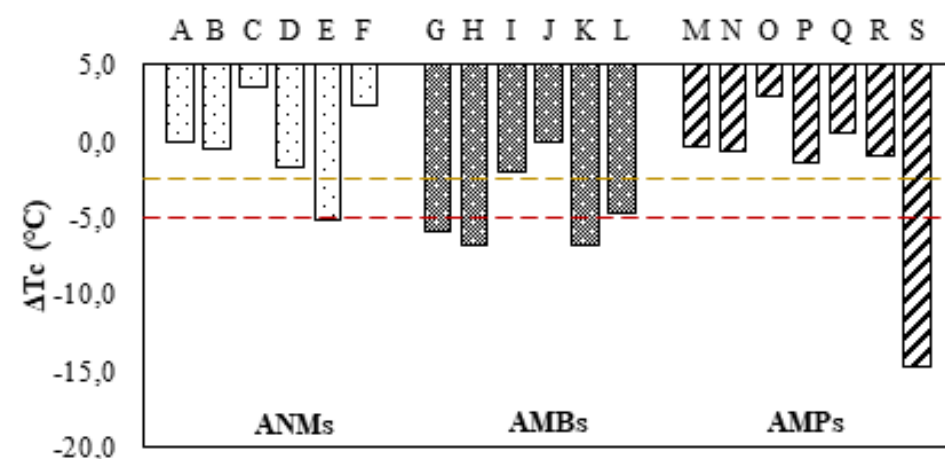


Figura 1. Resultados de ΔT_c , com indicação dos limites de $-2,5^{\circ}\text{C}$ e $-5,0^{\circ}\text{C}$ (ANDERSON *et al.*, 2011)

Na Figura 2, observou-se que com exceção dos ligantes H, K e S, todos os asfaltos estudados, das categorias ANMs, AMBs e AMPs, estiveram alinhados com os valores de R (9-59) estabelecidos pelo NCHRP 09-59 (2022), entre 1,5 e 2,5. Isso sugeriu um envelhecimento dos materiais que não resultou em enrijecimento excessivo, ideal para evitar o aumento da suscetibilidade ao dano por fadiga após os

processos RTFOT+PAV. Embora não existam faixas recomendadas para o Valor R, o ligante S se destacou-se com os maiores índices para ambos, R (9-59) e Valor R, sendo 3,33 e 5,08, respectivamente, o que poderia sugerir um desempenho inferior em condições de serviço devido a um potencial aumento na rigidez e consequente suscetibilidade ao dano por fadiga.

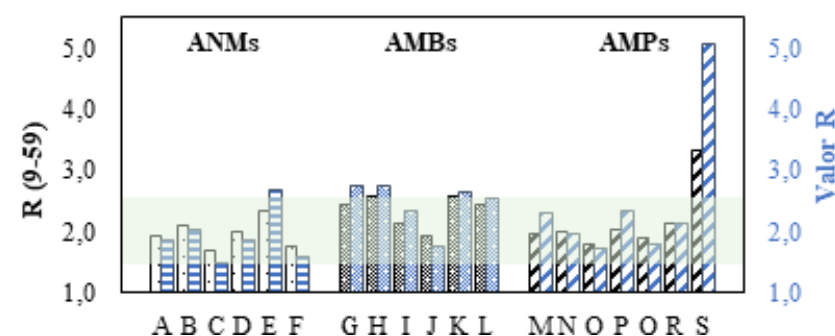


Figura 2. Resultados para o valor R, apresentados como R (9-59), conforme definido pelo projeto NCHRP 9-59 (2022), e valor R, obtido da curva mestra (ANDERSON *et al.*, 2011)

A evolução do parâmetro GR em função do envelhecimento dos ligantes asfálticos é apresentada na Figura 3. Nos diagramas de espaço *Black*, percebeu-se que todos os ligantes demonstraram um aumento progressivo no valor de GR com o envelhecimento, indicando um aumento na rigidez e uma redução da componente viscosa, levando a uma suscetibilidade ao trincamento em temperaturas intermediárias (ANDERSON *et al.*, 2011). Valores elevados de GR são indicativos de maior fragilidade e risco de dano, com limiares definidos a 180 kPa para início de dano e 600 kPa para trincamento significativo (CHRISTENSEN *et al.*, 2019).

No diagrama referente aos ANMs (Figura 3a), os pontos evoluíram claramente para a zona de dano mantendo os maiores ângulos de fase, com valores

similares aos apresentados por Rowe (2016). Para os AMBs (Figura 3b), embora tenham seguido uma tendência similar, os resultados indicaram que a modificação por borracha pode ter conferido propriedades que atenuam este efeito, apresentando uma menor evolução de envelhecimento desde seu ponto inicial com o material virgem com ângulos de fase na faixa de 55° a 65° . Os AMPs, por sua vez, mantiveram-se entre as zonas sem fissuras e zona de dano, com exceção notável do ligante S, cuja elevada rigidez e ângulo de fase reduzido indicam um risco acentuado de trincamento em bloco. De forma geral, os ANMs apresentaram maior variação no ângulo de fase durante o envelhecimento numa faixa de quase 20° , enquanto os modificados apresentaram trajetória vertical com variação máxima de 10° .

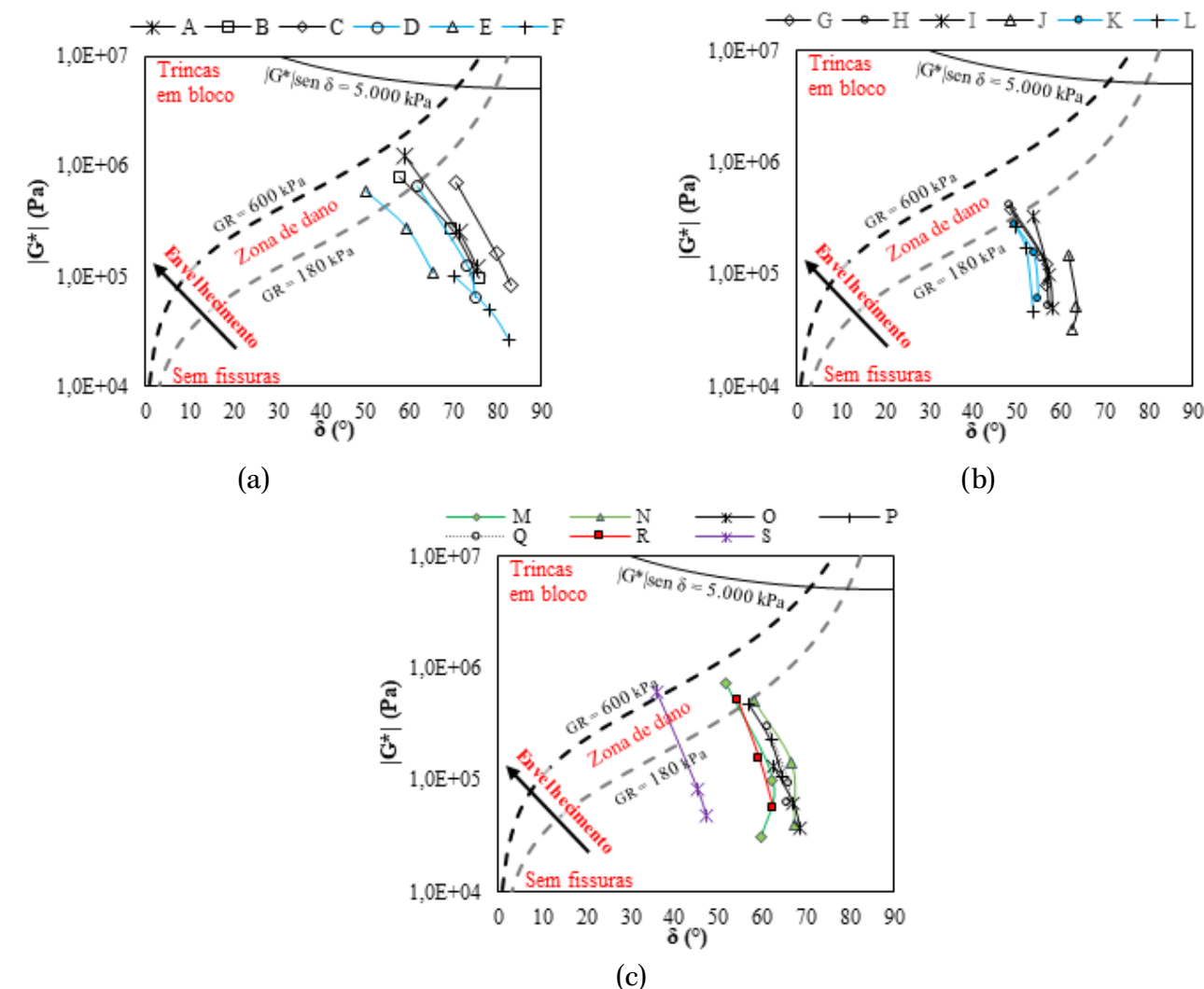


Figura 3. Evolução do parâmetro GR em função do envelhecimento, conforme ilustrado pelo diagrama de espaço *Black* para: a) ANMs, b) AMBs e c) AMPs

A Figura 4 oferece uma perspectiva detalhada sobre o impacto do envelhecimento em relação aos parâmetros ωc e valor R. Analisando os comportamentos exibidos, foi perceptível que o processo de envelhecimento tendeu a aumentar o valor R, com uma crescente rigidez, e a diminuir a frequência angular crossover, ωc , sugerindo uma perda na resposta elástica dos ligantes (ANDERSON *et al.*, 2011).

Para os ANMs (Figura 4a), como reportado por Rowe (2016), a evolução em direção a maiores valores de R e menores de ωc foi evidente, aludindo a um maior risco de trincamento à medida que o ma-

terial se tornou mais rígido com o envelhecimento. Esta tendência foi observada até para ligantes originalmente mais flexíveis, do tipo CAP 50/70. Nos AMBs (Figura 4b), também se constatou um aumento de R e redução de ωc com o envelhecimento, porém os valores se concentraram em um intervalo que sugere uma moderada suscetibilidade ao trincamento. Por fim, os AMPs (Figura 4c) mostraram um padrão similar, mas o ligante S se destacou negativamente, apresentando valores R notavelmente altos e de ωc baixos, indicativo de um endurecimento considerável.

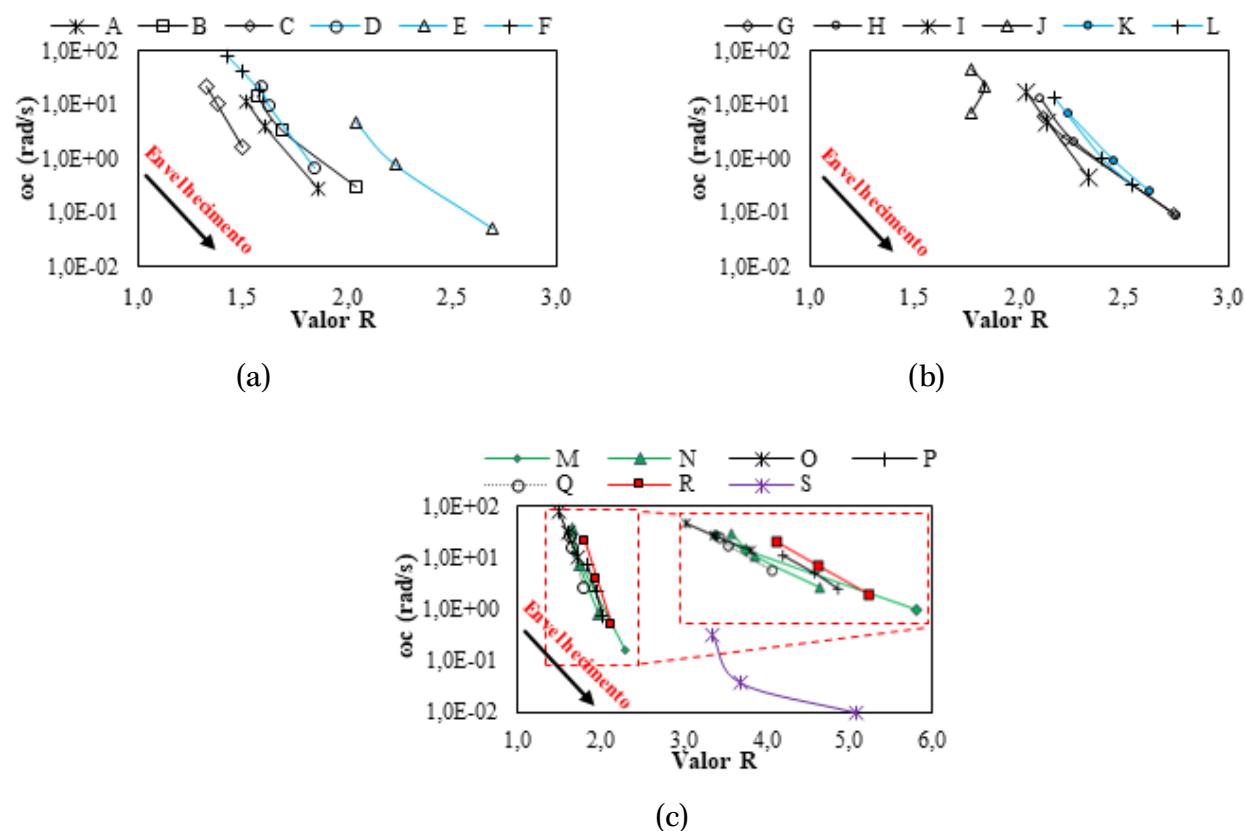


Figura 4. Evolução dos parâmetros ωc e valor R com o envelhecimento para: a) ANMs, b) AMBs e c) AMs

Estudos anteriores (ALISOV *et al.*, 2020, SCHRAEDER *et al.*, 2020) têm comprovado a influência do envelhecimento e do rejuvenescimento nos parâmetros BTSV dos ligantes asfálticos. Na Figura 5, avaliou-se o efeito do envelhecimento nestes parâmetros. A análise mostrou que, para todos os ligantes, o envelhecimento resultou em um aumento na temperatura BTSV e uma diminuição no ângulo de fase BTSV, apontando para um maior enrijecimen-

to e fragilidade após o processo no RTFOT. Essa tendência refletiu uma redução na capacidade de deformação elástica do material.

Assim como nas análises anteriores, o ligante S, originário da Rússia, após o RTFOT, mostrou um considerável aumento na temperatura BTSV e a maior redução no ângulo de fase BTSV, evidenciando um comportamento diferenciado.

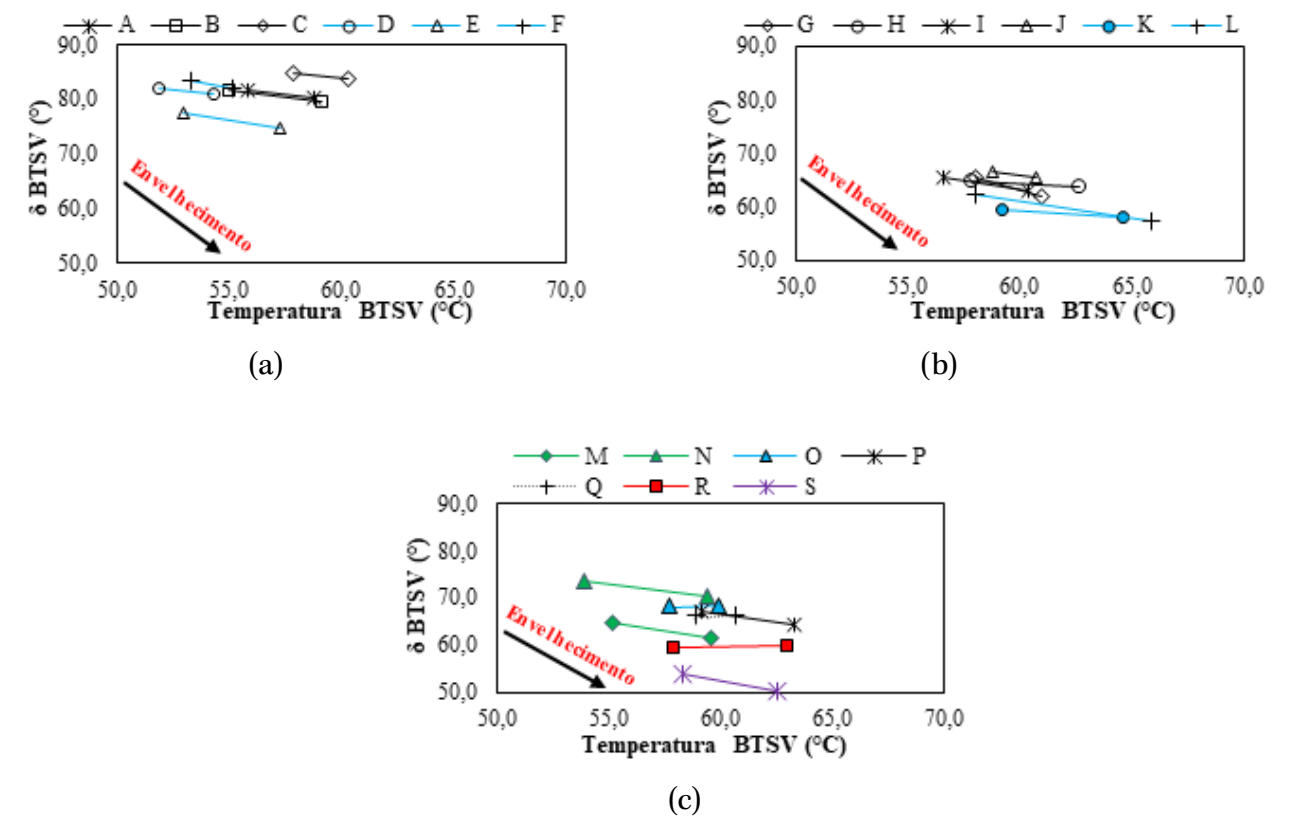


Figura 5. Efeito do envelhecimento nos parâmetros BTSV para: a) ANMs, b) AMBs e c) AMPs

Analisando a Figura 6, identificou-se um padrão de comportamento consistente com a progressão do envelhecimento. De maneira geral, como esperado, o módulo de cisalhamento dinâmico, $|G^*|$, aumentou, enquanto o ângulo de fase, δ , diminuiu para todos os ligantes conforme transitaram do estado virgem para o RTFOT e, posteriormente, para o RTFOT+PAV. Esse aumento no $|G^*|$ indicou um acréscimo na rigidez do ligante e a redução no δ apontou para uma componente elástica mais pronunciada no comportamento do material. Notou-se novamente que o ligante S se distinguiu dos demais, apresentando uma acentuada queda no ângulo de fase, o que pode significar um potencial elevado para problemas de fadiga com trincamento a baixas temperaturas.

Embora os parâmetros do ensaio BTSV não estejam diretamente ligados à danificação dos pavimentos, servem como um indicativo do compor-

tamento reológico dos ligantes em altas temperaturas, conforme observado por Schrader *et al.* (2020). A capacidade do BTSV de prever a rigidez dos ligantes em condições operacionais fornece uma medida indireta sobre este defeito no material.

Na Figura 7, observou-se uma clara influência do envelhecimento nos parâmetros relacionados à fadiga e deformação permanente dos ligantes. As linhas de tendência indicaram um incremento na correlação entre o ângulo de fase BTSV e os parâmetros FFL e Jnr3,2 a 64°C, evidenciando um aumento na previsibilidade do comportamento do ligante com o processo de envelhecimento RTFOT, quando comparado ao envelhecimento RTFOT+PAV. Isso é refletido no crescimento do coeficiente de determinação, R^2 , que no caso do FFL passou de 0,71 para 0,84 na Figura 7a, e no Jnr3,2 a 64°C, de 0,54 para 0,73 na Figura 7b.

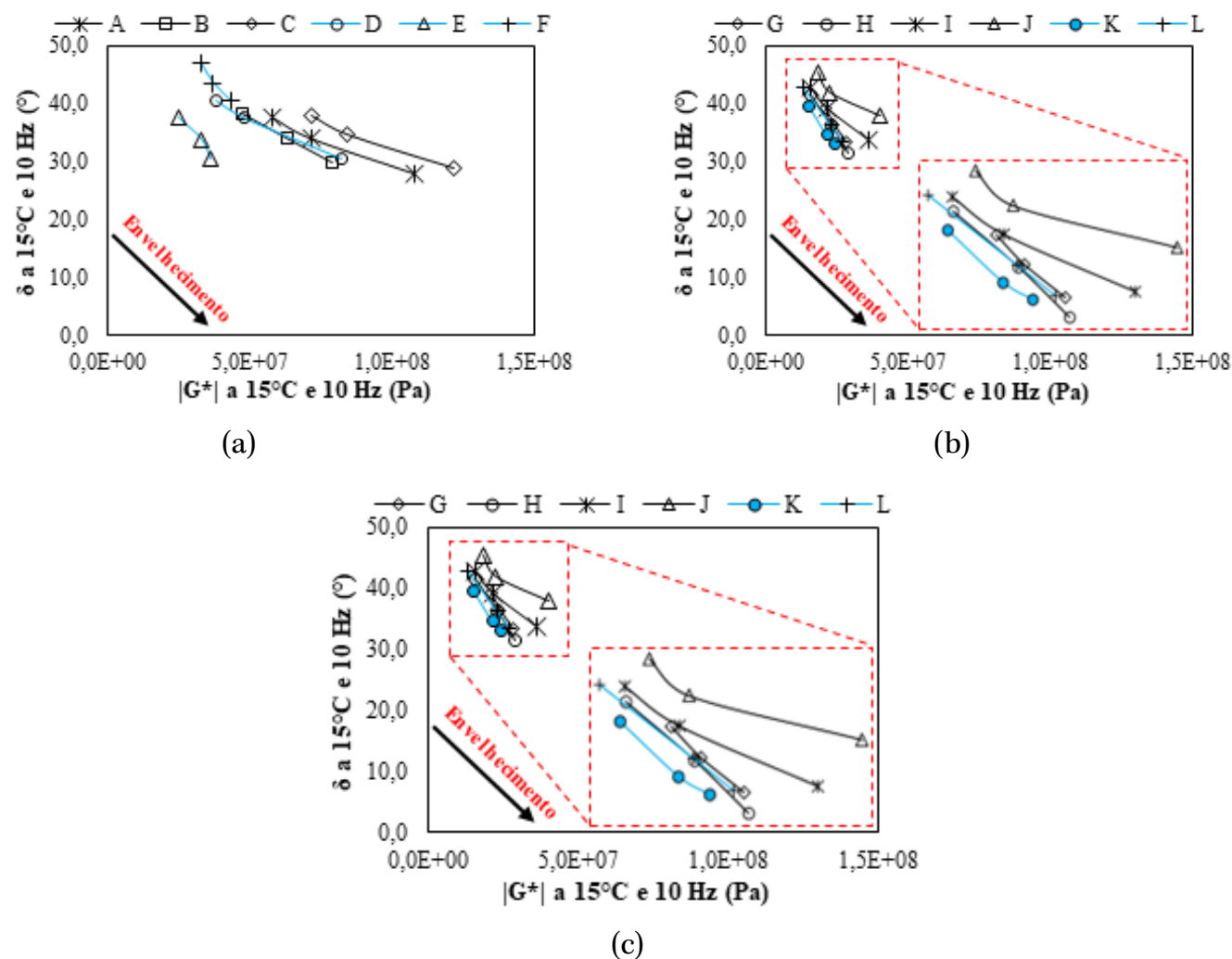


Figura 6. Efeito do envelhecimento nos parâmetros $|G^*|$ e δ a 15°C e 10 Hz para: a) ANMs, b) AMBs e c) AMPs

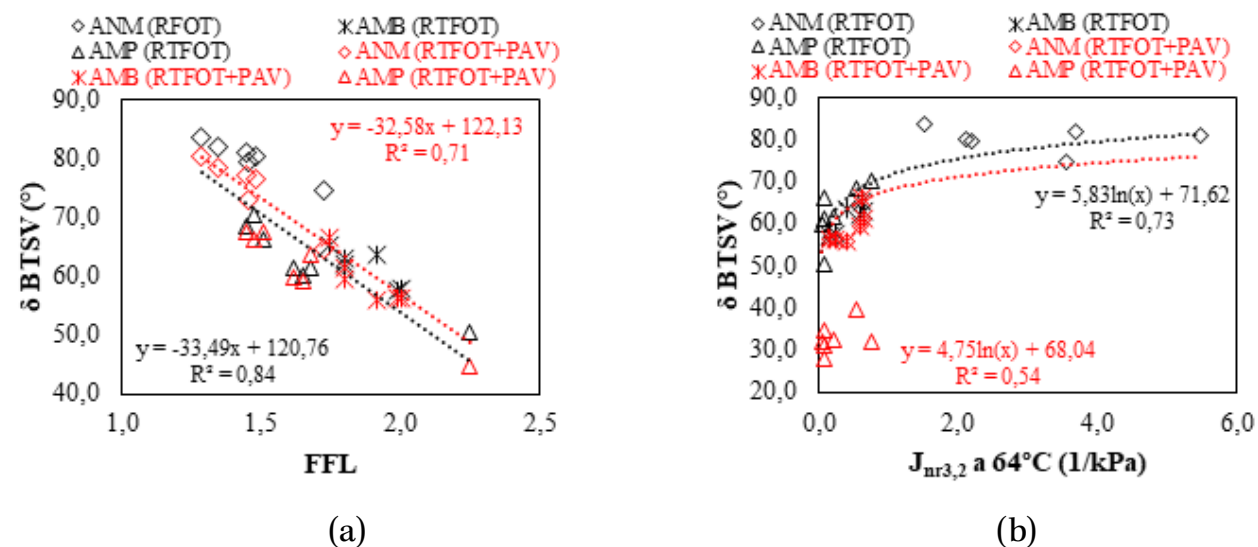


Figura 7. Influência do envelhecimento nos parâmetros de fadiga e de deformação permanente

A Figura 8 mostra características reológicas dos ligantes asfálticos agrupados de acordo com o seu tipo (ANMs, AMBs e AMPs) e suas respostas ao envelhecimento. Na Figura 8a, os ANMs se destacaram por possuírem ângulos de fase elevados, diferentemente da maioria dos ligantes dos grupos AMBs e AMPs, que não apresentaram diferenciação significativa. Na Figura 8b, a maioria dos AMBs, exceto o ligante J, apresentou valores maiores de R, sugerindo maior rigidez após o envelhecimento, com exceção do ligante S, para não distorcer a escala de comparação. A Figura 8c permitiu dife-

renciar os ANMs dos AMBs e AMPs com base em um ângulo de fase BTSV próximo a 75°. Por fim, a Figura 8d demonstrou uma diferenciação diagonal entre os ANMs e os outros ligantes, com exceção do ligante E.

Esta análise integrada reforçou a complexidade na seleção de ligantes asfálticos, para a qual a diferenciação baseada em critérios reológicos foi fundamental para atender aos requisitos de desempenho de pavimentos e sua durabilidade a longo prazo.

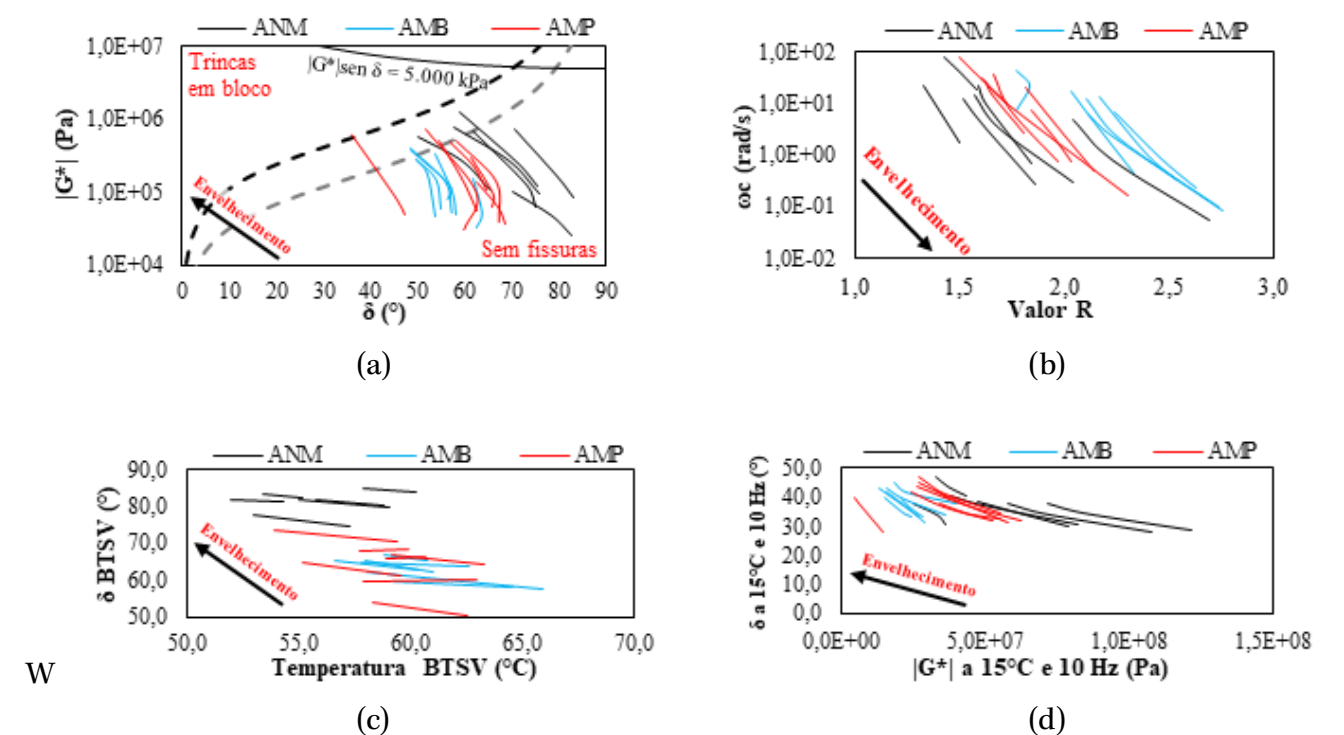


Figura 8. Agrupação de ligantes ANMs, AMBs e AMPs considerando: a) espaço Black, b) ω_c vs valor R, c) parâmetros BTSV e d) $|G^*|$ e δ a 15°C e 10 Hz

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou efeitos de envelhecimento em ligantes asfálticos, enfatizando a importância desse processo para a durabilidade dos pavimentos. Os resultados mostraram que o envelhecimento modificou as propriedades viscoelásticas lineares dos ligantes, aumentando sua rigidez e diminuindo sua capacidade de deformação, o que influencia diretamente a resistência à fadiga e à deformação permanente.

Destaca-se também a relevância dos parâmetros BTSV, que demonstraram capacidade de diferenciar os ligantes ANMs dos AMBs e AMPs, sugerindo sua potencial aplicabilidade como critério classificatório na seleção de ligantes. Essa distinção ressaltou a importância de compreender as características de cada tipo de ligante para otimizar seu uso em pavimentos.

A utilização do espaço Black permitiu observar que os limites atuais poderiam necessitar de ajustes para refletir adequadamente a realidade dos ligantes brasileiros. Uma proposta seria revisar esses limites com base em uma validação que envolvesse tanto ensaios com misturas asfálticas em laboratório quanto avaliações de desempenho em campo. Essa abordagem integrada ajudaria a estabelecer critérios mais precisos e adaptados para a seleção e uso de ligantes asfálticos em projetos de pavimentação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), e da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALISOV, A., et al. (2020). A novel method to characterise asphalt binder at high temperature. *Road Mater. Pavement Des.*, 21(1), 143-155.

ANDERSON, D. A., et al. (1991). Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications. *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 60.

ANDERSON, D. A., & KENNEDY, T. W. (1993). Development of SHRP binder specification. *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 62.

ANDERSON, R. M., et al. (2011). Evaluation of the relationship between asphalt binder properties and non-load related cracking. *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 80, 615-664.

BAHIA, H. U., & ANDERSON, D. A. (1995). Strategic highway research program binder rheological parameters. *Transp. Res. Rec.*, (1488).

BS EN 14770. (2023). Bitumen and bituminous binders. Determination of complex shear modulus and phase angle. *Dynamic Shear Rheometer (DSR)*.

CHRISTENSEN, D. W., & ANDERSON, D. A. (1992). Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements. *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 61.

CHRISTENSEN, D., et al. (2019). Past, present, and future of asphalt binder rheological parameters. *Transp. Res. Circ.*, (E-C241).

DONG, W., et al. (2020). Evaluation of anti-aging performance of biochar modified asphalt binder. *Coatings*, 10(11), 1037.

GLOVER, C. J., et al. (2005). Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation. *Texas Dept Transport*, 1872, 1-334.

LI, F., & WANG, Y. (2023). Use of accelerated natural aging to simulate long-term asphalt binder aging in pavements. *Transp. Res. Rec.*, 2678(2), 266-278.

LI, H., et al. (2019). Investigation of the effect of induction heating on asphalt binder aging in steel fibers modified asphalt concrete. *Materials*, 12(7), 1067.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. (2022). Relationships between the fatigue properties of asphalt binders and the fatigue performance of asphalt mixtures. Washington, DC: The National Academies Press.

NOTANI, M. A., et al. (2020). Investigating the high-temperature performance and activation energy of carbon black-modified asphalt binder. *SN Appl. Sci.*, 2(2).

PAN, P., et al. (2018). A comprehensive evaluation of rejuvenator on mechanical properties, durability, and dynamic characteristics of artificially aged asphalt mixture. *Materials*, 11(9), 1554.

ROWE, G. M. (2011). Prepared discussion for the AAPT paper by Anderson et al. *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 80, 649-662.

ROWE, G. M. (2016). ΔT_c - Some thoughts on the historical development. Presentation from 16th Asphalt Binder ETG Meeting, Salt Lake City, UT, April 25-28.

SCHRADER, J., et al. (2020). A new binder-fast-characterization-test using a dynamic shear rheometer. *J. Test. Eval.*, 48, 52-59.

KOYUN, A., et al. (2020). Rheological, spectroscopic and microscopic assessment of asphalt binder ageing. *Road Mater. Pavement Des.*, 23(1), 80-97.

Engenharia de PAVIMENTAÇÃO

A Revista PAVIMENTAÇÃO é um periódico técnico-científico editado e publicado pela ABPv – Associação Brasileira de Pavimentação, desde 2006. Atualmente, é disponibilizada exclusivamente no formato eletrônico através dos sites:

- www.abpv.org.br
- www.revistapavimentacao.org.br

MISSÃO DA ABPv

A ABPv tem como missão promover e incentivar o estudo, a pesquisa e a divulgação de temas relacionados à área da engenharia rodoviária, aeroportuária e ferroviária.

ARTIGOS TÉCNICOS

Na Revista PAVIMENTAÇÃO são veiculados artigos científicos, ensaios e estudos de caso de caráter exclusivamente técnico, inéditos, com temáticas pertinentes. Os trabalhos enviados para publicação são encaminhados ao Comitê Técnico Científico da ABPv, onde serão submetidos a rigorosos critérios de avaliação, garantindo segurança e credibilidade aos conteúdos disponibilizados aos leitores.

Como surgiu a ABPv

Há 65 anos a Associação Brasileira de Pavimentação está presente no cenário da infraestrutura de transportes do Brasil, promovendo a divulgação, o debate e o ensino da engenharia de pavimentação.

Sua história tem início numa época de grande entusiasmo de desenvolvimento rodoviário no país, os anos 50, quando o governo se dirigiu à realização de algumas rodovias importantes econômica e estrategicamente, e à melhoria de outras já existentes. A essa época, já era determinante que seriam utilizadas as técnicas da pavimentação para a garantia da qualidade das novas estradas e sua manutenção.

Nesse contexto, o engenheiro Mario Kabalem Restom, divagava com seus colegas de canteiros de serviços das obras rodoviárias sobre os benefícios que a engenharia nacional teria com a criação de uma associação em torno da pavimentação. Notadamente, seria o locus para sedimentar e aprofundar em estudos o que se observava no campo e debater novos ensaios e normas técnicas.

Da mesma ideia compartilhavam profissionais pioneiros da pavimentação no Brasil, como o engenheiro químico Pontes Corrêa, engenheiro Aldenor Campos e engenheiro Murillo Lopes de Souza.

Kabalem, então com espírito determinado, foi a mola propulsora da criação em 15 de setembro de 1959 da Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv, na cidade do Rio de Janeiro. A ata de fundação foi assinada pelos engenheiros Saul Birman, Aldenor Ribeiro Campos, Jacques de Medina, Francisco Bolívar Lobo Carneiro, Paulo Alvim Monteiro de Castro, Manuel Ribeiro Alves Filho, Décio Nascentes da Silva, Fernando Fonseca Martins, Washington Juarez de Brito e pelo próprio Kabalem. Concretizava-se assim o ideal compartilhado com o químico Pontes Corrêa, que faleceu antes de ver seu sonho realizado.

Vale mencionar que já em 1951 a comunidade científica rejubilou-se com a criação do Conselho Nacional de Pesquisas, onde no seu âmbito, passou a funcionar, em 1957, o renomado Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, que foi muito importante na trajetória da ABPv.

No ano seguinte a sua criação, a ABPv realizou a primeira Reunião Anual de Pavimentação – RAPv. Nessa ocasião foi instituído pela Equipe Editora/Revista Construção, do engenheiro Aldenor Ribeiro Campos, o Prêmio Pontes Corrêa. A honra era destinada àqueles profissionais que contribuíam com relevância e destaque para a engenharia de pavimentação nacional. E posteriormente, o Prêmio Pontes Corrêa tornou-se a maior

honraria concedida pela ABPv.

Com o avanço dos estudos e desenvolvimento da infraestrutura do país, a pavimentação se estendeu também para os modais ferroviário, portuário e aeroportuário.

Ao longo desses 65 anos a ABPv vem realizando periodicamente a Reunião Anual de Pavimentação – RAPv, e a Reunião de Pavimentação Urbana – RPU, dois importantes eventos nacionais do setor. São publicados periodicamente boletins informativos, livros, anais e a Revista PAVIMENTAÇÃO, uma referência em seu seguimento.

A área acadêmica que desenvolve pesquisas sobre mecânica de pavimentos, materiais, desempenho funcional e sistemas de gerência, muito deve à ABPv pelas oportunidades oferecidas de divulgação e discussão de seus trabalhos produzidos em monografias, dissertações e teses de pós-graduação.

O meio empresarial, no que tem de mais esclarecido, reconhece o papel que associações como a ABPv representam para o prestígio da Engenharia brasileira. Por isso, registram-se apoios financeiros para reuniões técnicas, publicações em geral e premiações.

E finalmente o setor governamental como prefeituras, Departamentos Estaduais (DERs) e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) têm na ABPv um grande suporte através dos congressos, cursos e palestras para atualização de novos métodos e tecnologias mundialmente aplicadas.

Portanto, a ABPv é agente e testemunha de todos os esforços da engenharia nacional de pavimentação.

1ª Diretoria da ABPv. A partir da esquerda: Eng. Paulo Alvim Monteiro de Castro, Eng. Saul Birman, Eng. Mario Kabalem Restom, Eng. Jacques de Medina, Eng. Aldenor Ribeiro Campos, Eng. Manoel Ribeiro Alves Filho e Eng. Francisco Bolívar Lobo Carneiro



AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO AGREGADO-LIGANTE E O EFEITO DE BIOMATERIAIS COMO MODIFICADORES ASFÁLTICOS

Haline Dugolin Ceccato¹

Jéssica da Silva Vieira¹

Rinaldo José Barbosa Pinheiro¹

Luciano Pivoto Specht¹

Andréa Valli Nummer¹

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, haline.ceccato@gmail.com; vieirajessica.jv96@gmail.com; rinaldo@ufsm.br; luspecht@gmail.com; anummer@gmail.com.

DOI: 10.21536/abpv.v53.2

RESUMO

O setor rodoviário busca estar em constante evolução para atender as mudanças climáticas e de volume de tráfego presentes nas vias, com isso, a busca por melhorar as propriedades mecânicas e aumentar o tempo de vida útil do pavimento se faz necessária. Assim, o uso de modificadores de ligante asfáltico, presentes na literatura e certificado por apresentar grandes resultados reológicos e mecânicos, desafia o setor a buscar diferentes alternativas alinhadas a sustentabilidade e que possuam a presença de material biológico. Dessa forma, a lignina se destaca como um promissor modificador, com estudos mostrando seu potencial para melhorar a adesividade do ligante asfáltico. Portanto, o objetivo do estudo é investigar a influência agregado-ligante, através do ensaio normalizado DNER-ME 078/94, utilizando ligante convencional 50/70 e ligante misturado com lignina extraída de Pinus e Eucalipto, em concentrações de 0.5% a 5%, junto com substratos de rochas vulcânicas (PIN) e plutônicas (MIN). Como principais resultados, para o ligante puro ambas as amostras apresentaram adesividade insatisfatória, em diferentes níveis. Quando comparado as rochas e a presença de ligante com lignina, as amostras PIN foram satisfatórias em todas as porcentagens, em contrapartidas as amostras MIN foram satisfatórias apenas as porcentagens de 0.5% e 5%, as demais MIN insatisfatórias utilizou-se a escala de classificação visual de Brondani et al. (2022), os resultados diferem quando a porcentagem de lignina incorporado e a origem de lignina presente. Dessa forma, o estudo contribuiu para a compreensão do uso de biomateriais e a delimitação de alguns parâmetros importantes para conhecimento.

PALAVRAS-CHAVE: Ligante Asfáltico; Lignina de Eucalipto; Lignina de Pinus; Adesividade;

ABSTRACT

The road sector is constantly evolving to meet the changing climate and volume of traffic on the roads, so the search to improve the mechanical properties and increase the useful life of the sidewalk is necessary. Thus, the use of asphalt binder modifiers, found in the literature and certified as having great rheological and mechanical results, challenges the sector to look for different alternatives that are aligned with sustainability and contain biological material. In this way, lignin stands out as a promising modifier, with studies showing its potential to improve asphalt binder adhesion. Therefore, the study aims to investigate the aggregate-binder influence, using the standardized DNER-ME 078/94 test, using conventional 50/70 binder and binder mixed with lignin extracted from Pinus and Eucalyptus, in concentrations of 0.5% to 5%, together with volcanic (PIN) and plutonic (MIN) rock substrates. As the main results, for the pure binder, both samples showed unsatisfactory adhesion, to varying degrees. When comparing the rocks and the presence of a binder with lignin, the PIN samples were satisfactory in all percentages, while the MIN samples were satisfactory only in the 0.5% and 5% percentages, while the other MIN samples were unsatisfactory using the visual classification scale of Brondani et al. (2022).

KEYWORDS: Asphalt Binder; Eucalyptus Lignin; Pine Lignin; Adhesiveness;

INTRODUÇÃO

A pavimentação asfáltica, um campo em constante evolução, busca continuamente aprimorar as propriedades do ligante asfáltico para melhorar a durabilidade e o desempenho das estruturas viárias. A introdução de agentes modificadores ou aditivos tem sido uma prática comum para melhorar as propriedades elásticas e mecânicas dos ligantes asfálticos, visando aprimorar sua adesividade, susceptibilidade térmica, resistência à oxidação, resistência ao envelhecimento e durabilidade (READ; WHITECOAK, 2003. FANG *et al.*, 2013. WANG; WANG, 2019).

Nesse contexto, a modificação por polímeros tem se mostrado eficaz em vários estudos (LUCENA, 2005. BRINGEL, 2007. LIMA, 2008. SOBREIRO, 2014. NASCIMENTO, 2015). Os polímeros mais usuais são os polímeros SBS (copolímero de estireno-butadieno-estireno), polietileno, SBR (borracha de estireno-butadieno), borracha de pneu moído e EVA (copolímero de etileno e acetato de vinila) (BRINGEL, 2007). Dessa forma, aliado à busca por modificadores de ligantes asfálticos surge em paralelo o conceito de sustentabilidade e isso vem abrindo espaço para tecnologias com a utilização de modificadores naturais e reaproveitados de processos industriais.

Em algumas pesquisas é possível observar o uso de produtos naturais associados aos ligantes asfálticos, incluindo óleos vegetais, lignina, fibras de biomassa, lodos, asfalto natural e enxofre (LENI *et al.*, 2012. SILVEIRA *et al.*, 2014. NANJEGOWDA e BILIGIRI, 2020. HEMIDA e ABDELRAHMAN, 2021. NAVEED *et al.*, 2022). Dentre esses, a lignina destaca-se como um promissor modificador, com pesquisas como as de Xu *et al.* (2017), Luo *et al.* (2019), Gao *et al.* (2020), Yu *et al.* (2021), Fakhri e Norouzi, (2022).

A lignina, um biopolímero tridimensional presente em plantas lenhosas, surge como uma alternativa promissora para a melhoria da adesividade do ligante asfáltico. Sua estrutura química complexa, composta por unidades fenilpropanóides, confere-lhe propriedades adesivas que podem ser exploradas na formulação de misturas asfálticas (LUO, 2010. PILÓ-VELOSO *et al.*, 1993). Além disso,

a variabilidade na estrutura química da lignina, influenciada por fatores como a planta de origem, localização no vegetal e condições ambientais, apresenta desafios e oportunidades para sua utilização (BELGACEM *et al.*, 2003; HERNÁNDEZ, 2007).

Segundo Botaro *et al.* (2006), a lignina possui estrutura relativamente semelhante do ponto de vista macromolecular aos componentes do Cimento Asfáltico de Petróleo, assim como ocorre com a associação dos demais polímeros com o ligante, em que é crucial a compatibilidade entre ambos para se obter melhores desempenhos, esse material poderá também trazer melhorias ao asfalto convencional no que diz respeito às suas propriedades reológicas. A presença de enxofre na constituição da lignina pode auxiliar na redução da oxidação de ligantes asfálticos, mitigando o processo de envelhecimento dos compostos do ligante (WILLIAMS e MCCREADY, 2008). No entanto, a variabilidade estrutural da lignina e a presença de enxofre representam desafios na sua utilização, destacando a importância de uma lignina mais uniforme para prever suas propriedades e projetar pavimentos adequadamente.

Nesse contexto, este estudo visa investigar a adesividade do ligante asfáltico com a lignina extraída de pinus e eucalipto, utilizando como substratos duas rochas de naturezas distintas: uma de origem vulcânica e outra plutônica. A escolha desses materiais se justifica pela sua diversidade mineralógica e textural, que podem influenciar a interação entre o ligante asfáltico modificado com lignina e a superfície da rocha.

Compreender o comportamento adesivo desses sistemas é crucial para o desenvolvimento de misturas asfálticas mais resilientes e sustentáveis. Além disso, este estudo busca fornecer insights valiosos para o avanço da tecnologia de pavimentação asfáltica e promover a utilização de materiais renováveis na construção civil.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais utilizados

Caracterização do agregado

Este estudo empregou duas variedades distintas de rochas, uma de origem vulcânica e outra plutônica, ambas localizadas no estado do Rio Grande

do Sul (RS), Brasil. A pedreira Brita Pinhal (PIN), situada na cidade de Itaara-RS, pertence ao Derrame Basáltico no Planalto, caracterizando-se como uma rocha vulcânica ácida. Por outro lado, a pedreira Minersul (MIN), localizada no município de Capão do Leão-RS, faz parte do Escudo Sul-Riograndense e é composta por Granito Capão do Leão, inserido na Suíte Dom Feliciano, na margem do Batólito de Pelotas (CECCATO, 2021). A seguir, na Tabela 1, são apresentadas as características distintivas de cada material.

Tabela 1. Características dos agregados empregados (AUTORES, 2024).

Nomenclatura	Origem	Classificação Petrográfica	Massa específica aparente (g/cm³)	Absorção (%)
PIN	Itaara – RS	Riodacito	2,48	2,04
MIN	Capão do Leão – RS	Sienogranito	2,51	0,42

Caracterização convencional do ligante asfáltico

O ligante convencional 50/70 utilizado neste estudo foi adquirido da Refinaria Henrique Lage

(REVAP), situada em São José dos Campos, no Vale do Paraíba, São Paulo - Brasil. Corresponde, principalmente, pelo abastecimento do mercado paulista e do centro-oeste do país. As especificações detalhadas deste ligante estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Características do ligante 50/70 (PETROBRAS, 2024).

Ligante	Penetração (0,1 mm, 25°C)	Ponto de amolecimento (°C)
50/70 REVAP	55	51

Caracterização da lignina

A lignina é comumente obtida através do processo químico conhecido como processo *Kraft*. Neste estudo, o licor negro foi produzido no Laboratório de Química da Madeira (LAQUIM), vinculado ao curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), que utiliza o processo Kraft em escala de bancada (Kraft (reação da madeira com hidróxido de sódio + sulfeto de sódio) o mais usual no contexto industrial brasileiro, onde 81% do processamento é realizado dessa maneira (CASTRO, 2009). Após a obtenção do licor,

foi adotado um método comum encontrado na literatura, descrito ao longo do texto. O procedimento laboratorial para produção de lignina, foi realizado no Laboratório de Análises Químicas (LACHEM), vinculado ao curso de Química, também da UFSM.

Para obter a lignina final, é necessário um material bruto originário do licor negro. As madeiras utilizadas nesse trabalho são de Eucalipto e Pinus destacam-se por suas características distintas, sendo reconhecidas por seu crescimento rápido, densidade moderada e durabilidade. Distintas em suas distribuições geográficas, mas adaptabilidade a diferentes condições climáticas e tipos de solo. São

utilizadas em diversas aplicações, incluindo construção civil, fabricação de móveis, papel e celulose, e como fonte de energia de biomassa.

Produção do Licor Negro

O processo químico Kraft, amplamente utilizado na indústria de papel, é uma técnica eficaz para produzir celulose a partir da madeira. Durante o processo, cavacos de madeira são cozidos em uma solução alcalina conhecida como mistura de licor branco, composta principalmente por hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, resultando na dissolução da lignina. A celulose é então separada das fibras e processada para formar polpa. O licor é recuperado e passa por uma etapa de recuperação química para remover a lignina e recuperar produtos químicos alcalinos. A polpa de celulose resultante é posteriormente lavada, branqueada e seca para produzir papel. Durante a etapa de cozimento da madeira, na qual a lignina é removida, forma-se licor que, devido à presença de resíduos de lignina, degradação de celulose e outros compostos, adquire uma tonalidade escura. Após a extração da polpa, o licor negro é submetido a um processo de recuperação química, onde produtos valiosos como hidróxido de sódio e sulfeto de sódio são recuperados para reutilização no processo de produção de polpa.

Extração de Lignina

A extração da lignina do licor negro envolve a separação da lignina dissolvida por meio de técni-

cas como precipitação e filtração. Após esse processo, a lignina pode ser utilizada em diversas aplicações, como na fabricação de bioplásticos, adesivos, produtos químicos ou como combustível para geração de energia. Além de contribuir para a obtenção de celulose pura, esse método favorece a recuperação de produtos químicos valiosos presentes no licor negro, promovendo a eficiência e a sustentabilidade do processo.

Após uma minuciosa avaliação dos diferentes métodos de extração provenientes da literatura, foi precipitado 100 mL de licor negro de Eucalipto e Pinus, em 40 mL de um ácido, com base nos estudos de Gouvêa (2012), o melhor ácido testado e em 20% em peso da amostra foi o ácido sulfúrico, o que foi o trabalho base para estabelecer a porcentagem usada em todos os procedimentos. Após a decantação, os materiais foram filtrados e lavados com água destilada. A etapa final foi a secagem em um forno a 60 °C.

Preparação da mistura

Os biomateriais foram incorporados ao ligante asfáltico por meio de um processo de mistura manual controlado. A temperatura da mistura foi mantida a 135°C, com um tempo de mistura precisa e controlada de 3 minutos. Os teores utilizados na incorporação da lignina ao CAP 50/70 são apresentados na Tabela 3 assim com as nomenclaturas utilizadas para cada mistura.

Tabela 3. Teor de lignina Eucalipto e Pinus utilizado (AUTORES, 2024).

Tipo de Lignina	Teor utilizado	Rocha	Nomenclatura
Eucalipto (E) / Pinus (P)	0,5	Vulcânica (PIN) / Plutônica (MIN)	MIN + 0,5 E / MIN + 0,5 P PIN + 0,5 E / PIN + 0,5 P
	1,0		MIN + 1 E / MIN + 1 P PIN + 1 E / PIN + 1 P
	2 %		MIN + 2 E / MIN + 2 P PIN + 2 E / PIN + 2 P
	3 %		MIN + 3 E / MIN + 3 P PIN + 3 E / PIN + 3 P
	5 %		MIN + 5 E / MIN + 5 P PIN + 5 E / PIN + 5 P

Execução do ensaio e análise visual

O ensaio de adesividade seguiu as diretrizes

presentes na norma DNER-ME 78/94, apresentando os resultados de maneira qualitativa, satisfatória ou insatisfatória e, de modo quantitativo, como representado na Figura 1, utilizando a escala de *Ranking* de Brondani *et al.* (2022).

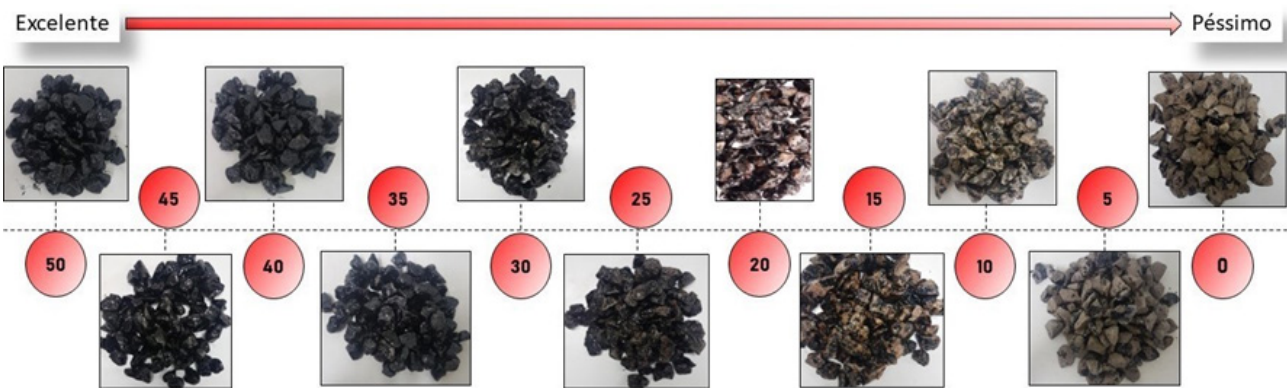


Figura 1. *Ranking* de Brondani *et al.* (2022) (CECCATO, 2021).

O ensaio visa investigar o desgaste da película asfáltica que cobre o agregado graúdo quando exposto à água. Para conduzir os testes, uma amostra de 500g do agregado, passando pela peneira de 19 mm e retida na peneira de 12,7 mm, foi preparada, lavada e seca em estufa. Em paralelo, o ligante foi aquecido. Após a preparação, 17,5g da mistura ligante + teor

de lignina pré-definida, foram inseridos ao agregado. Após o resfriamento, o material foi imerso em água destilada e mantido em repouso a 40°C por 72 horas. Após esse período, foram conduzidas análises qualitativas e quantitativas da interação entre o agregado e o ligante. O Figura 2 exemplifica os procedimentos realizados.



Figura 2. Fluxograma do procedimento realizado na pesquisa (AUTORES, 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico os resultados serão apresentados primeiramente de modo separados, ou seja, inicialmente o ligante puro sem modificações, na sequência a modificação com lignina eucalipto e, posteriormente, modificação com lignina pinus.

Ligante Virgem

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos com o uso do ligante virgem, ou seja, sem adição de modificadores, após a realização do ensaio de adesividade. É importante notar que o ensaio descrito pela DNER-ME 78/94 possui limitações, fornecendo resultados qualitativos, nos quais a adesividade é considerada satisfatória se o recobrimento for completo e insatisfatório, caso contrário.

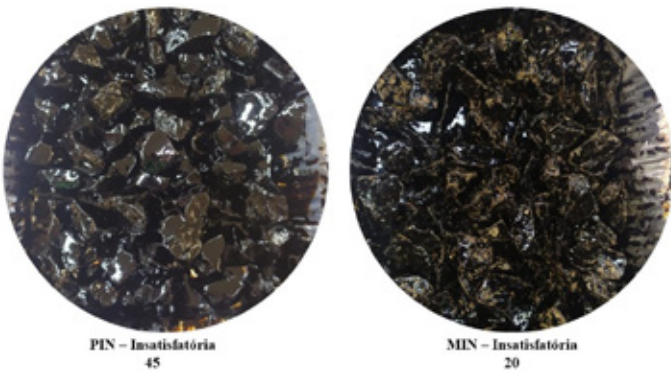


Figura 3. Resultado adesividade com ligante puro (AUTORES, 2024).

Os resultados do ensaio indicaram que, independentemente da litologia da rocha (vulcânica - PIN, ou plutônica - MIN), a cobertura do ligante sobre o agregado foi considerada insatisfatória. Embora o uso do ligante 50/70 para ambos os agregados não tenha apresentado adesividade adequada sem a adição de um aditivo, foi observado que a cobertura do filme asfáltico ocorreu de maneiras distintas.

Com base na análise visual conduzida por Brondani *et al.* (2022), foi constatado que a pedra PIN demonstrou um índice de adesividade de 45, enquanto a pedra MIN apresentou um índice de 20.

Este resultado está em conformidade com as conclusões discutidas na literatura, que indicam que rochas de origem básica tendem a exibir uma adesão superior em comparação com as rochas ácidas.

Essa disparidade pode ser atribuída à interação entre os grupos funcionais presentes na superfície dos agregados e o ligante asfáltico. Agregados como granitos frequentemente contêm grupos silanol (Si-OH) em sua estrutura superficial, os quais são polares e interagem com a água, liberando íons hidrogênio (H+), conferindo uma carga negativa à superfície. Essa carga negativa resulta em uma repulsão com o ligante asfáltico, que é apolar e de caráter ácido, prejudicando sua adesão aos agregados. Além disso, os agregados ácidos têm uma propensão reduzida à absorção devido a essas características superficiais (DONG *et al.*, 2017. HARNISH, 2010. BAGAMPADDE; ISACSSON; KIGGUNDU, 2005. BELL, 1998. GEBER e GÖMZE, 2009).

Ligante Virgem + lignina eucalipto

A interação entre o ligante modificado com lignina de Eucalipto e os agregados empregados foi influenciada pela quantidade adicionada à mistura. A Figura 4 apresenta a avaliação visual conforme a norma DNER-ME 78/94 (satisfatório ou insatisfatório), assim como o valor obtido pelo *Ranking* Visual de Brondani *et al.* (2022).

Observou-se uma resposta satisfatória da interação entre o ligante modificado com lignina de Eucalipto e os agregados de rocha vulcânica (PIN), independentemente do teor de lignina utilizado. No entanto, para os agregados de rocha plutônica, apenas os teores de 0,5% e 5% de lignina apresentaram adesão satisfatória. Houve um aumento gradual da adesividade à medida que o teor de lignina aumentou de 1% para 5%, com uma dispersão uniforme da fibra de lignina nessas misturas. Por outro lado, para os demais teores, a dispersão foi menos uniforme, levando a possíveis pontos de coagulação e áreas com baixa aderência ao agregado.

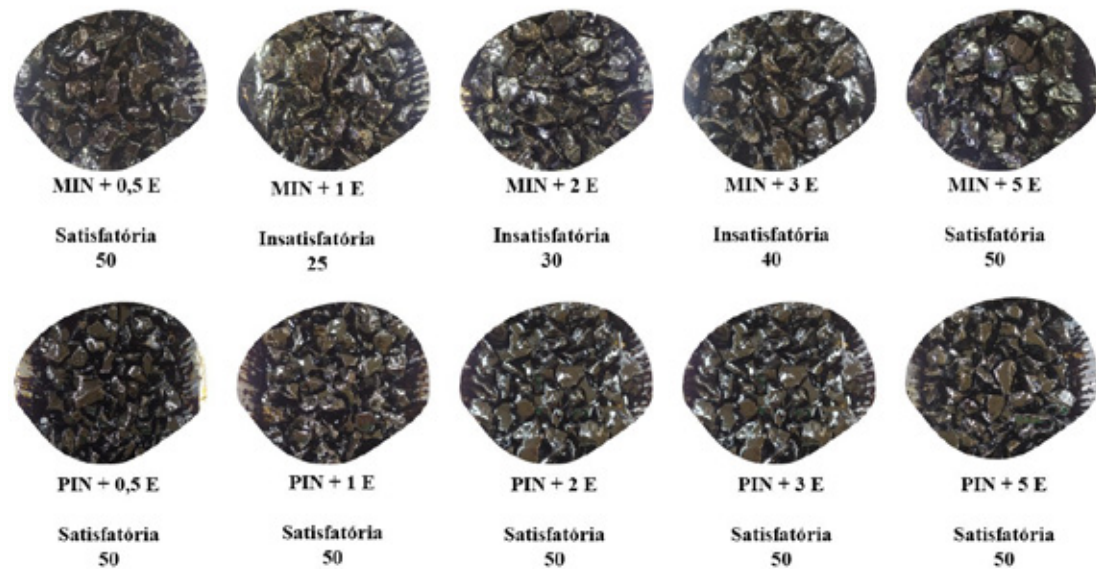


Figura 4. Resultado de adesividade com ligante + lignina Eucalipto (AUTORES, 2024).

Ligante Virgem + lignina pinus

A interação entre o ligante modificado com lignina de pinus e os agregados empregados revelou variações significativas de acordo com a quantidade

adicionada à mistura. A Figura 5 apresenta a análise visual dos resultados conforme a norma DNER-ME 78/94 (classificando-os como satisfatórios ou insatisfatórios), juntamente com os valores obtidos pelo *Ranking* Visual de Brondani *et al.* (2022).

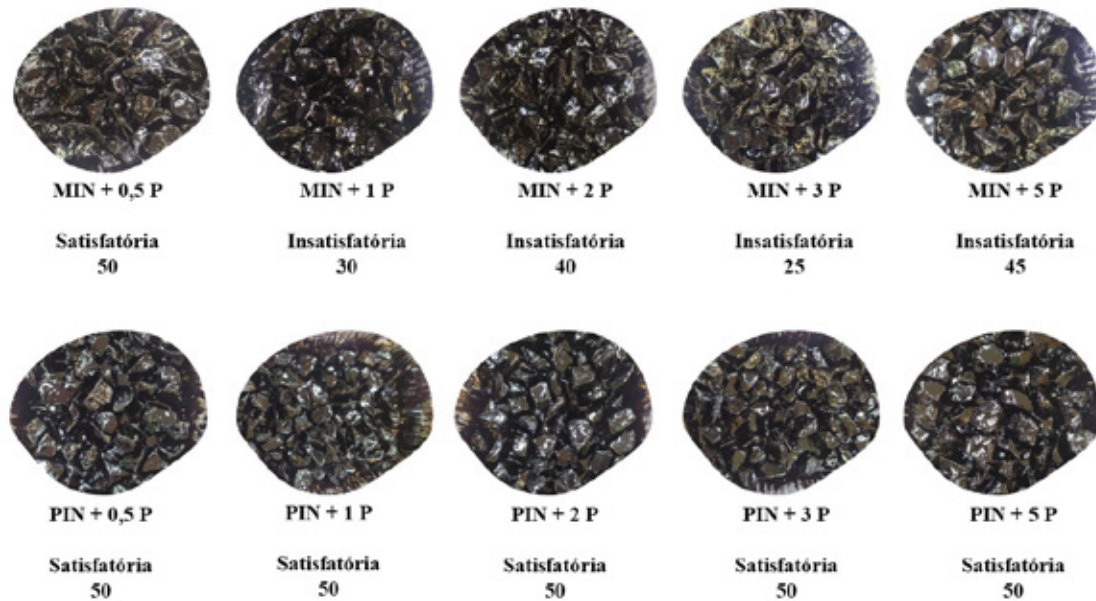


Figura 5. Resultado de adesividade com ligante + lignina Pinus (AUTORES, 2024).

A adição de lignina de Pinus ao ligante 50/70 resultou em adesão satisfatória para os agregados de rocha vulcânica, independentemente do teor de lignina. No entanto, para os agregados de rocha plutônica, apenas o teor de 0,5% apresentou resultados satisfatórios. Os teores de 1% e 2% apresen-

taram uma melhoria leve, mas insuficiente para uma boa adesão. O teor de 3% piorou a adesão em comparação com as outras misturas. O teor de 5% mostrou uma relação mais satisfatória, mas ainda insuficiente para cobrir todo o agregado, resultando em falta de aderência em alguns pontos.

Síntese da análise

Conforme evidenciado, a modificação de ligantes asfálticos com lignina requer uma avaliação cuidadosa em relação ao tipo de lignina, teor empregado e origem litológica dos agregados. Es-

tes três fatores influenciam significativamente a propriedade de adesão entre agregado e ligante. A Figura 6 exibe o *Ranking* de Brondani *et al.* (2022) com imagens das misturas ligante + lignina de Eucalipto e ligante + lignina de Pinus, exemplificando o mencionado anteriormente.

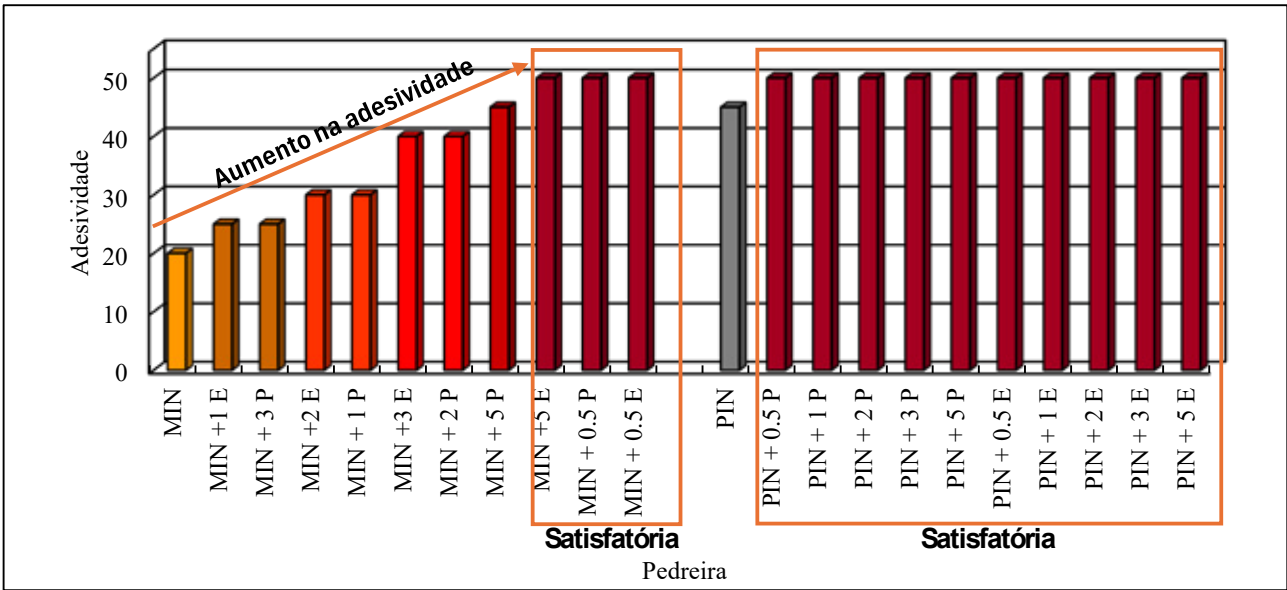


Figura 6. Amostras analisadas inseridas no Ranking Brondani et al. (2022) (AUTORES, 2024).

Observa-se um aumento gradual na força de adesão até atingir um nível satisfatório. No entanto, este estudo não conseguiu corroborar os achados de Fayzrahmanova *et al.* (2015), que sugerem uma redução na força de adesão após um certo percentual, possivelmente devido ao excesso de lignina na mistura. O excesso de lignina pode resultar em uma dispersão não uniforme, levando à coagulação e formação de pontos fracos na mistura, o que pode prejudicar a adesão ao agregado, como discutido por Chen *et al.* (2009).

CONCLUSÃO

Em suma, este estudo investigou a modificação de ligantes asfálticos com lignina e sua influência na adesão aos agregados de diferentes origens litológicas. Os resultados obtidos destacam a importância de considerar o tipo de lignina, o teor empregado e a origem dos agregados ao formular misturas asfálticas modificadas. Observou-se que a adição de lignina pode melhorar a adesão entre o ligante e os agregados, especialmente para agregados de rocha vulcânica.

No entanto, é importante ressaltar que o aumento excessivo no teor de lignina pode resultar em problemas de dispersão e coagulação, afetando negativamente a adesão. Portanto, é crucial encontrar um equilíbrio na formulação das misturas asfálticas modificadas para garantir uma adesão adequada e duradoura ao longo do tempo.

Além disso, este estudo contribui para o avanço da compreensão sobre o uso de materiais renováveis na indústria de pavimentação asfáltica, promovendo práticas mais sustentáveis e resilientes. No futuro, pesquisas adicionais são necessárias para otimizar as formulações de ligantes asfálticos modificados com lignina e explorar seu potencial em diferentes condições e aplicações de pavimentação.

Em última análise, os resultados deste estudo fornecem insights valiosos para engenheiros de pavimentação e profissionais da indústria, contribuindo para o desenvolvimento de pavimentos mais duráveis, econômicos e ambientalmente amigáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento à pesquisa e às bolsas de pesquisa. Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), o Grupo de Estudo e Pesquisa em Pavimentação (GEPPASV) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, pelo suporte oferecido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGAMPADDE U, ISACSSON U, KIGGUNDU BM (2006) Impact of bitumen and aggregate composition on stripping in bituminous mixtures. *Mater Struct* 39:303– 315.

BELL FG (1998) *Engineering geology*. Blackwell, London, p 359.

BRINGEL, R. M. Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos. 2007. 174 f. Dissertação (Mestrado em Química Orgânica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

BRONDANI, C; FACCIN, C.; SPECHT, L. P.; NUMMER, A. V.; DA SILVA PEREIRA, D.; VESTENA, P. M. BARONI, M. Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures: Influence of Aggregates, Visual Analysis, and Mechanical Tests. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, v. 35, p. 1-13, 2022.

CASTRO, H. F. Papel e Celulose. 2009. 30 f. Apostila 4 (Disciplina Processos Químicos Industriais II). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, 2009.

CECCATO, H. C. (2021). Avaliação e caracterização do comportamento geomecânico de agregados oriundos de jazidas da região sudeste do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 284p.

CHEN, H.; XU, Q.; CHEN, S.; ZHANG, Z. Evaluation and design of fiber- reinforced asphalt mixtures. *Journal of Materials and Design*. Vol. 30, pp. 2595-2603, 2010.

DNER. Agregado Graúdo – Adesividade a ligante betuminoso - DNER-ME 78/94. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DONG, Z.; LIU, Z.; WANG, P.; GONG, X. Nanostructure characterization of asphalt- aggregate interface through molecular dynamics simulation and atomic force microscopy. *Fuel*, v. 189, p. 155–163, 2017.

FAKHRI, M., & NOROUZI, M. A. (2022). Rheological and ageing properties of asphalt bio-binders containing lignin and waste engine oil. *Construction and Building Materials*, 321, 126364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126364>.

FANG, C.; RUIEN YU, S. L.; LI, Y. Nanomaterials Applied in Asphalt Modification: A Review. *Journal of Materials Science & Technology*, 589-594, 2013.

FAYZRACHMANOVA, G. M., ZABELKIN, S. A., GRACHEV, A. N., AND BASHKIROV, V. N., Study of the Properties of a Composite Asphalt Binder Using Liquid Products of Wood Fast Pyrolysis. *Polymer Science, Series D*, Vol. 9, No. 2, pp. 181–184, 2015.

GAO, J., WANG, H., LIU, C., GE, D., YOU, Z., AND YU, M. (2020). High-Temperature Rheological Behavior and Fatigue Performance of Lignin Modified Asphalt Binder. *Construction Building Mater.* 230, 117063. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117063](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117063).

GEBER R, GOMZE LA (2009) Investigation of hydrophilic and hydrophobic properties of different mineral fillers for asphalt mixtures. In: *Proc 11th ECERS Conf*, Krakow, Poland, 21–25 June 2009, pp 945–950.

GOUVÊA, A. F. G. (2012). Produção de briquete a partir da adição da lignina kraft com resíduo da indústria moveleira. Tese UFV. Viçosa, MG.

HARNISH, I. C. Liquid Anti-Strip Technology & Best Practices. Technical Manager Asphalt Additives. ArrMaz Custom Chemicals, Overland Park, USA, 2010.

HEMIDA, A., & ABDELRAHMAN, M. (2021). Component analysis of bio-asphalt binder using crumb rubber modifier and guayule resin as an innovative asphalt replacer. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105486. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105486>.

HERNÁNDEZ, J. A. Lignina organosolv de *Eucalyptus dunnii* maiden, poliuretano para madeira. 93 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

LENI, L. F. M.; CHACUR, M.; NASCIMENTO, L. A. H.; CRAVO, M. C.; MARTINS, A. T. The use of vegetal products as asphalt cement modifier. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul, 2012.

LIMA, C. S. Caracterização de ligantes asfálticos modificados com borracha de pneu e aditivo. 2008. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

LUCENA, M. C. C. Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros. 2005. 163f. Tese (Doutorado em Química Inorgânica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

LUO, D., KHATER, A., YUE, Y., ABDELSALAM, M., ZHANG, Z., LI, Y., et al. (2019). The Performance of Asphalt Mixtures Modified with Lignin Fiber and Glass Fiber: A Review. Construction Building Mater. 209, 377–387. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.126.

LUO, J. Lignin-based carbon fiber. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia química). Universidade de Maine, 2010.

NANJEGOWDA, V. H., & BILIGIRI, K. P. (2020). Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review of applied research and advancement in technology. Resources, Conservation and Recycling, 155, 104655. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104655>.

NASCIMENTO, T. C. B. Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativo e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados. 2015. 274 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

NAVEED, M., RAZA, M. A., & MEHMOOD, R. (2022). Performance analyses of conventional hot mix asphalt with waste additives. Case Studies in Construction Materials, 16, e00850. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00850>.

PILÓ-VELOSO, D. NASCIMENTO, E. A.; MORAIS, S. A. L. Isolamento e análise estrutural de ligninas. Química Nova, v. 16, n. 5, p. 435-448, 1993.

READ, J., e C. D. WHITEOAK. The shell bitumen handbook. London: Thomas Telford Publishing, 2003.

SILVEIRA, I. V. S. Propriedades reológicas sob altas temperaturas de ligantes asfálticos modificados com óleo da moringa. 43a RAPv – Reunião Anual de Pavimentação e 17 ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Maceió, 2014.

SOBREIRO, F. P. Efeito da adição de ácidos fos-

fóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS. 2014. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

WANG C, WANG Y. Physico-chemo-rheological: Characterization of neat and polymer-modified asphalt binders. Constr Build Mater 199:471–482.

WILLIAMS, R. C.; MC CREADY, N. S. The Utilization of Agriculturally Derived Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder. InTrans Project Reports, 2008.

XU, GUANGJI; WANG, HAO; ZHU, Hongzhou. Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin. Construction and Building Materials, v. 151, p. 801-808, 2017.

YU, J., VAIDYA, M., SU, G., ADHIKARI, S., KOROLEV, E., AND SHEKHOVTSOVA, S. (2021). Experimental Study of Soda Lignin Powder as an Asphalt Modifier for a Sustainable Pavement Material. Construction Building Mater. 298, 123884. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123884.



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO PREVISTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO NORDESTE BRASILEIRO QUANTO À FADIGA COM O USO DO MEDINA

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS OF BOX TEST USING POLYMERIC RAILWAY SLEEPER

Arthur Veras Moreira¹

Iuri Sidney Bessa¹

Beatriz Chagas Silva Gouveia²

Juceline Batista dos Santos Bastos³

Jorge Barbosa Soares¹

¹ Universidade Federal do Ceará, arthurveras@alu.ufc.br; iuri@det.ufc.br; jsoares@det.ufc.br

² Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, beatriz.gouveia@dnit.gov.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, juceline.santos@ifce.edu.br

DOI: 10.21536/abpv.v53.3

RESUMO

Este estudo aborda o fenômeno do trincamento por fadiga em pavimentos asfálticos localizados na região Nordeste. Diversos parâmetros influenciam na vida útil dos pavimentos frente à fadiga, tais como a composição das misturas asfálticas, tamanho máximo nominal dos agregados, tipo de ligante, entre outros. Nesse sentido, o método de dimensionamento MeDiNa, recentemente recomendado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), apresenta abordagens atualizadas e novas diretrizes para a pavimentação no Brasil. O objetivo desta pesquisa é compreender o comportamento das misturas asfálticas em relação à fadiga conforme as previsões do MeDiNa, visando otimizar o dimensionamento e a durabilidade dos pavimentos na região Nordeste. Para isso, foram avaliadas seis misturas asfálticas típicas da região, caracterizando suas propriedades mecânicas de acordo com o método. Os ensaios de Fadiga por Compressão Diametral, Resistência à Tração e Módulo de Resiliência foram conduzidos nas misturas, agrupadas em três categorias de fadiga, destacando-se a influência do teor de ligante e do volume de vazios. As misturas analisadas mostraram consistência entre suas classificações de fadiga e a previsão de trincamento do pavimento, com as misturas de menor classificação trincando mais cedo. Além disso, o artigo ressalta a importância da espessura adequada do revestimento para evitar trincamento e deterioração prematura. Por fim, o estudo ressaltou a necessidade de implementar medidas que melhorem o desempenho dos pavimentos frente à fadiga, considerando a inadequação das soluções convencionais e a importância de adaptações específicas às condições da região Nordeste.

PALAVRAS-CHAVE: Trincamento por Fadiga; Previsões do MeDiNa; Misturas Asfálticas do Nordeste.

ABSTRACT

This study addresses the phenomenon of fatigue cracking in asphalt pavements in the Northeast region of Brazil. Several parameters influence pavement fatigue life, such as asphalt mixture composition, nominal maximum aggregate size, asphalt binder type, among others. In this context, the MeDiNa design method, recently recommended by the Brazilian National Department of Infrastructure and Transport (DNIT), provides new guidelines for pavement design in Brazil. The objective of this research is to understand the behavior of asphalt regarding fatigue prediction according to MeDiNa, aiming to optimize pavement design and durability in the Northeast region. Six typical asphalt mixtures from this region were evaluated, by characterizing their mechanical properties. Diametral Compression Fatigue, Indirect Tensile Strength, and Resilient Modulus laboratorial tests were conducted, grouping the asphalt mixes into three fatigue categories, highlighting the influence of asphalt binder content and air voids content. The asphalt mixtures analyzed we consistently classified according to fatigue and pavement cracking predictions, with lower-rated mixes correctly predicted to crack earlier. Additionally, the paper emphasizes the importance of adequate pavement thickness to prevent premature cracking and deterioration. Finally, the study highlighted the need to implement measures that improve pavement performance in relation to fatigue, considering the inadequacy of conventional solutions and the importance of specific adaptations to Northeast region conditions.

KEYWORDS: Fatigue Cracking; MeDiNa Predictions; Northeast Asphalt Mixtures.

INTRODUÇÃO

Diversos pesquisadores têm mostrado a influência de parâmetros da dosagem de misturas asfálticas na resistência à fadiga, como origem mineralógica e granulometria dos agregados (GUABIROBA *et al.*, 2023), volumetria (SANTOS, 2005), tipo de ligante asfáltico (COLPO, 2014), entre outros. A depender do nível de tráfego solicitado pela rodovia, algumas soluções podem ser adotadas para melhorar a durabilidade e o desempenho do pavimento. Estruturas de pavimento constituídas por camadas estabilizadas quimicamente, ou seja, base e/ou sub-base com adição de cimento (MARODIN, 2010), uso de ligantes modificados por polímero na mistura asfáltica da camada de revestimento (QUEIROZ *et al.*, 2023) e seleção criteriosa da granulometria de agregados têm sido estratégias para mitigar a fadiga precoce em pavimentos rodoviários (OLIVEIRA, 2019).

A previsão da evolução de trincamentos por fadiga é importante para prevenir sua ocorrência e melhorar o dimensionamento das camadas do pavimento asfáltico. O desempenho desses pavimentos em relação a este defeito, normalmente monitorado em campo por meio da medição da porcentagem de área trincada na superfície da estrutura, pode ser aprimorado. Isso inclui o projeto de misturas asfálticas que atendam às classes de fadiga propostas pelo método de dimensionamento nacional (MeDiNa), de forma a resultar em pavimentos mais duráveis e que atendam melhor às solicitações de tráfego. O MeDiNa introduz uma abordagem atualizada e novas diretrizes para a pavimentação no Brasil. Ao romper com o empirismo do método tradicional (SOUZA, 1981), incorpora ensaios de caracterização de rigidez, como o de Módulo de Resiliência (MR) (DNIT 135/2018-ME), e de vida de fadiga, como o ensaio de Compressão Diametral (CD) (DNIT 183/2018-ME). Ambos os ensaios não consideram adequadamente variáveis viscoelásticas, embora representem avanços práticos para a infraestrutura rodoviária nacional (SANTOS, 2020). O método de dimensionamento baseia-se em duas premissas principais: (i) a previsão de defeitos a partir das condições de carregamento utilizando um sistema de dimensionamento; e (ii)

a seleção de materiais adequados pelo projetista, que, ao variar seus constituintes e espessuras, escolhe uma combinação ideal de estrutura de camadas e subleito para atender às especificações técnicas.

Diante do exposto, o presente artigo tem a finalidade de avaliar o desempenho mensurado pelas previsões do *software* MeDiNa em 6 misturas asfálticas, situadas no Nordeste, em relação ao percentual de área trincada. Com base nesses resultados, discute-se soluções atenuadoras ao dano causado pela fadiga nestes pavimentos em detrimento aos pavimentos flexíveis tipicamente empregados nessa região.

MATERIAIS

Para a presente pesquisa, foram caracterizadas 6 diferentes misturas asfálticas oriundas do Ceará, Maranhão e Piauí, para a obtenção dos parâmetros exigidos no *software* MeDiNa, de forma que fosse possível gerar as curvas de previsões de área trincada para as estruturas testadas. A Tabela 1 apresenta as características de dosagem dessas misturas asfálticas, tais como tipo e teor do Cimento asfáltico de Petróleo (CAP), Volume de vazios (Vv), densidade máxima medida (Gmm), faixa granulométrica e Tamanho Máximo Nominal (TMN) dos agregados. Além dessas informações, vale destacar que a Mistura 04 utiliza, além da matriz pétreo natural, 2% de cimento como filer em sua composição

Tabela 1. Parâmetros de dosagem

Mistura asfáltica	Tipo de CAP	Densidade máxima medida, Gmm	Teor de CAP (%)	Volume de vazios, Vv (%)	Faixa granulométrica	Tamanho máximo nominal, TMN (mm)
01	50/70	2,421	6,0	5,6	C (DNIT)	12,5
02	50/70	2,542	4,9	3,9	C (DNIT)	12,5
03	50/70	2,468	4,0	4,6	A (DNIT)	25,0
04	50/70	2,573	4,6	4,6	B (DNIT)	19,0
05	60/85-E	2,416	6,6	3,0	C (DNIT)	12,5
06	50/70	2,396	6,1	3,5	C (DNIT)	19,0

MÉTODOS

Os ensaios de fadiga (CD), Resistência à Tração (RT) e rigidez (MR) foram conduzidos para caracterizar as misturas e comparar os resultados obtidos para os diferentes materiais testados. Além disso, os dados de MR e os coeficientes de calibração do modelo de fadiga foram usados nas previsões de área trincada.

Vida de Fadiga

O ensaio de CD proporciona a aplicação de tensões de tração indiretas no material, com carregamento executado sempre no mesmo sentido em um dado ponto e plano de avaliação das tensões. Os resultados são processados conforme modelagem matemática exposta na Equação 1, que combina os parâmetros de ensaio para obtenção da curva de fadiga.

$$N = k_1 \times \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{k_2} \quad (1)$$

Em que: N corresponde ao número de repetições de carga necessárias à ruptura do corpo de prova (vida de fadiga); ϵ_i corresponde à deformação de tração inicial; k_1 e k_2 são parâmetros experimentais.

O Fator de Fadiga da Mistura (FFM) pode ser calculado a partir da construção da curva de Wöhler, que relaciona a deformação específica resiliente de tração inicial (ϵ_i) e o número de ciclos correspondente à ruptura do corpo-de-prova durante o ensaio de fadiga (Equação 2). Com os valores de FFM

e do MR das misturas asfálticas, é possível classificá-las em diferentes categorias quanto à resistência à fadiga, por meio de metodologia desenvolvida por Fritzen *et al.* (2019). A Figura 1 traz a regressão do trabalho de Fritzen *et al.* (2019) para determinar as classes com um número de repetições padrão de 30% de área trincada. A referida metodologia foi incorporada ao *software* MeDiNa.

$$R(9-59) = \log(2) * \frac{\log(S/3.000)}{\log(1-m)} \quad (2)$$

Em que: FFM corresponde ao Fator de Fadiga da Mistura; N_{100} corresponde ao número de ciclos de carga até a ruptura para a deformação específica de 100 $\mu\epsilon$; N_{250} corresponde ao número de ciclos de carga até a ruptura para a deformação específica de 250 $\mu\epsilon$.

Todos os corpos de prova das misturas foram ensaiados por meio do CD seguindo DNIT 183/2018-ME. O parâmetro de fadiga adotado para o cálculo do FFM foi a deformação específica resiliente, que corresponde à razão entre a tensão de tração sobre o MR da mistura. A partir do valor de FFM, analisou-se em qual classe de fadiga ela se encontra. As classes variam de 0 a 4, sendo a 0 indicada até o tráfego correspondente a um número N de $4,5 \times 10^6$ e a 4 indicada para o tráfego superior a um número N de $1,0 \times 10^7$.

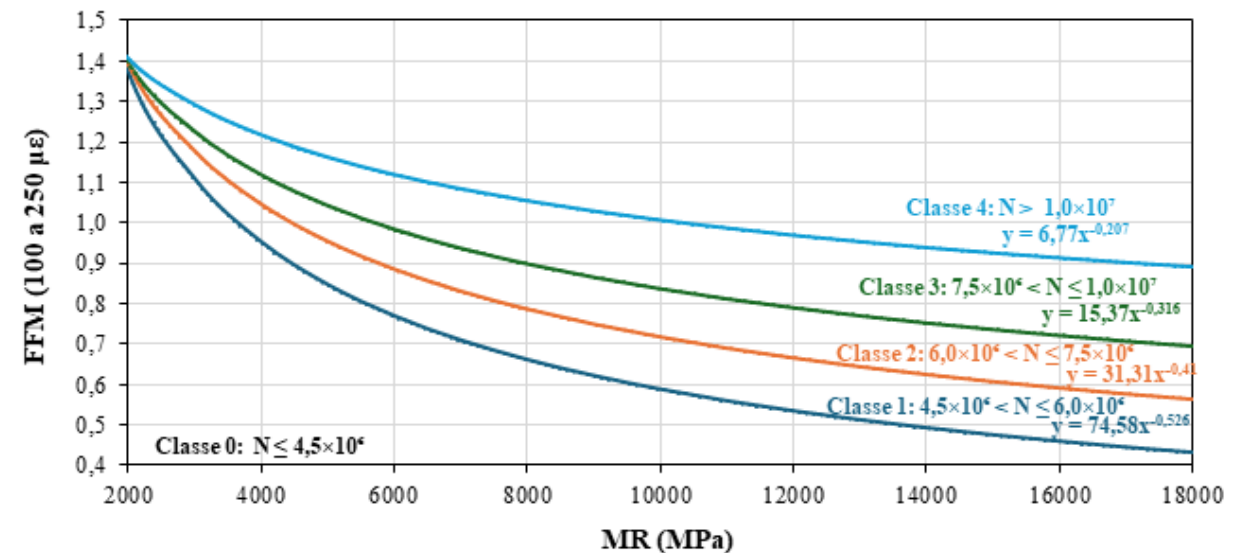


Figura 1. Classificação quanto à fadiga de misturas asfálticas (adaptada de Fritzen *et al.*, 2019)

Resistência à Tração (RT)

A análise da resistência máxima de misturas asfálticas à tração é medida de maneira indireta preconizado pela norma DNIT 136/2018-ME. Trata-se de um parâmetro de caracterização consolidado, com diversos autores defendendo seu emprego para a aquisição de dados sobre propriedades mecânicas de misturas asfálticas, com as seguintes vantagens: emprego relativamente fácil, pouca influência de condicionantes superficiais no processo de fissuração contínua até o rompimento, simulação de um estado de tração como ocorre na zona inferior do pavimento sobre carregamento (QUEIROZ e VISSER, 1978; PREUSSLER, 1983). De maneira geral, no Brasil, esse ensaio é realizado por uma prensa de carregamento monotônico a 25 °C. A tensão é aplicada de maneira a produzir continuamente dano até ruptura, sendo o cálculo desta tensão máxima de ruptura expresso na Equação 3 (DNIT-ME 136/2018).

$$RT = \frac{2F}{\pi \phi h} \quad (3)$$

Em que: RT corresponde ao valor de Resistência à Tração uniformemente distribuída no eixo horizontal (MPa); F corresponde à força de aplicação sobre o CP (N); ϕ e h são os valores de diâmetro e espessura do CP, respectivamente (mm).

Módulo de Resiliência (MR)

A análise do MR de misturas asfálticas surgiu da necessidade de se obter um parâmetro de rigidez da camada de revestimento, de modo que pudesse ser relacionado com as rigidezes das demais camadas, possibilitando a avaliação e dimensionamento de pavimentos com materiais e espessuras suficientes de modo que se obtivesse uma resposta estrutural às solicitações do tráfego satisfatória. Dada a complexidade de análise do comportamento viscoelástico das misturas, assumiu-se caráter elástico linear para esses materiais sob certas condições de contorno. Fixada uma temperatura, um corpo de prova pode assumir caráter elástico linear, no qual tem-se uma rigidez constante, quando se é aplicado carregamentos por um período suficientemente longo e de módulo correspondendo a uma fração da tensão de ruptura (RT) (HUANG, 1993). No Brasil, esse parâmetro é determinado a partir da norma DNIT 135/2018-ME, que consiste na previsão da rigidez das misturas asfálticas por meio do MR obtido a 25 °C, a uma frequência de 1 Hz, com 0,1 s de aplicação de carga e 0,9 s de descanso, com carga entre 5% e 25% do valor de RT obtido em ensaios prévios. Na prática, ele corresponde à razão da tensão de tração exercida sobre o corpo de prova com a deformação resiliente no plano horizontal. Assumindo que os corpos de prova possuem diâmetro fixo e que o coeficiente de Poisson é estabelecido

como 0,30, chega-se à solução da Equação 4 (DNIT 135/2018-ME).

MR = (P (0,2692 + 0,997μ)) / (ΔH)t (4)

Em que: MR corresponde ao Módulo de Resiliência (MPa); P corresponde à carga cíclica aplicada (N); μ é o coeficiente de Poisson; t é a espessura do CP (mm); ΔH corresponde ao deslocamento horizontal resiliente (mm).

Previsões de Trincamento por Fadiga com o Uso do MeDiNa

Para as previsões realizadas no MeDiNa, assumiu-se um número N acumulado ao longo de 10 anos de projeto igual a 5×10⁷, considerando o cálculo a partir das equações da United States Army Corps of Engineers (USACE). A Tabela 2 apresenta as principais propriedades dos materiais considerados nas estruturas propostas, como MR, coeficiente de Poisson, espessura das camadas e tipo de materiais que compuseram as camadas das estruturas ana-

lisadas. Para as camadas inferiores ao revestimento asfáltico, foram utilizados materiais típicos que balizaram todas as análises do MeDiNa, de modo que as variações de desempenho recaíssem sobre a camada de revestimento do pavimento, principal objeto de estudo do presente artigo. Por sua vez, as misturas asfálticas foram caracterizadas e analisadas sob duas condições: (i) com espessura de 10 cm, na qual assume-se que é uma espessura mais representativa encontrada em campo; (ii) com espessura de 15 cm, na qual se potencializa ao máximo a durabilidade do revestimento no contexto do dimensionamento MeDiNa. Ademais, o método de dimensionamento MeDiNa avalia que, a partir de 30% de área trincada da superfície do pavimento, compromete-se seu uso, portanto adotou-se esse valor como critério de ruptura, de modo que os pavimentos dimensionados não devessem ultrapassar esse limite antes dos 120 meses de vida útil.

Diante do exposto, foi feita a comparação dos resultados das previsões de área trincada por meio do MeDiNa sob condições de contorno pré-estabelecidas, para as Misturas com espessura normalmente encontrada em campo e espessura máxima adotado pelo software, no qual as simulações de desempenho tem seus parâmetros potencializados.

Tabela 2. Padrão das composições de camadas dos pavimentos

Estruturas dos Pavimentos					
Camadas	1	2	3	SL	
Material	Concreto Asfáltico	Granular	Solo fino, siltoso ou argiloso	Subleito	
Tipo	-	Brita Gradua- da Simples, Gnaiss C5	Solo Argiloso, LG'(1)	Solo Siltoso, NS'	
Espessura (cm)	-	15,0	15,0	-	
MR (MPa)	-	381	250	189	
Coeficiente de Poisson	0,30	0,35	0,45	0,45	
Caracterização das Misturas Asfálticas					
Mistura	Espessura (cm)	MR (MPa)	k ₁	k ₂	Massa específica (g/ cm³)
01	10/15	6.497	8,471E-15	-4,309	2,280
02		8.042	6,186E-16	-4,557	2,460
03		6.114	3,360E-10	-3,163	2,364
04		11.298	3,334E-12	-3,653	2,470
05		3.008	1,156E-08	-2,997	2,312
06		4.650	5,138E-07	-2,441	2,293

RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com a Figura 2a, as 6 misturas asfálticas analisadas obtiveram desempenho satisfatório no que tange os resultados de RT, pois atingiram valores acima do limite mínimo de 0,65 MPa (DNIT 031/2006-ES). Os menores valores de RT foram observados para as Misturas 05 e 06, que possuem os maiores teores de ligante e os menores volumes de vazios (Vv), na mesma faixa granulométrica (Faixa C do DNIT). Possivelmente, a combinação do baixo volume de vazios com os altos teores de ligante influenciaram esses valores inferiores.

Analisando a Figura 2b, percebe-se uma importante variação dos valores de MR. Outrossim, observa-se a formação de 3 grupos de MR: as Misturas 01, 02 e 03 possuem valores intermediários; as Misturas 05 e 06 têm baixa rigidez; a Mistura 04 tem elevada rigidez. Em síntese, o conjunto formado pelas misturas de MR intermediário possuem o mesmo ligante asfáltico (CAP 50/70), com teores variando entre 4 e 6%, bem como valores de Vv entre 3,9 e 5,6%. Presume-se que a disposição

dos parâmetros de dosagem supracitados tenha resultado nesses valores de MR relativamente próximos. Já no que diz respeito ao grupo com valores baixos de MR, destacam-se a presença de ligante modificado com polímero do tipo elastômero na Mistura 05 (CAP 60/85-E) e a relação dos teores de ligante asfáltico das Misturas 05 (6,6%) e 06 (6,1%) mais altos, bem como os menores valores de volume de vazios. Diante disso, o uso de ligante modificado (Mistura 05) garantiu aspectos de menor rigidez, tal como previsto por Queiroz et al. (2023). Concomitantemente, presume-se a existência de uma tendência da queda do MR quando aumentado o teor de ligante asfáltico e diminuído o volume de vazios. Harvey e Tsai (1996) observaram que quanto maior o teor de ligante, menor é a rigidez, o que corrobora com a hipótese supracitada; por outro lado, o adensamento das misturas relacionado com a composição granulométrica (interação ligante-fíler) resulta num aumento de sua rigidez (BARDINI; FERNANDES JÚNIOR; KLINSKY, 2013). Diante disso, o fato de haver cimento na composição da Mistura 04 torna a hipótese mais plausível quanto ao comportamento em laboratório com relação ao MR.

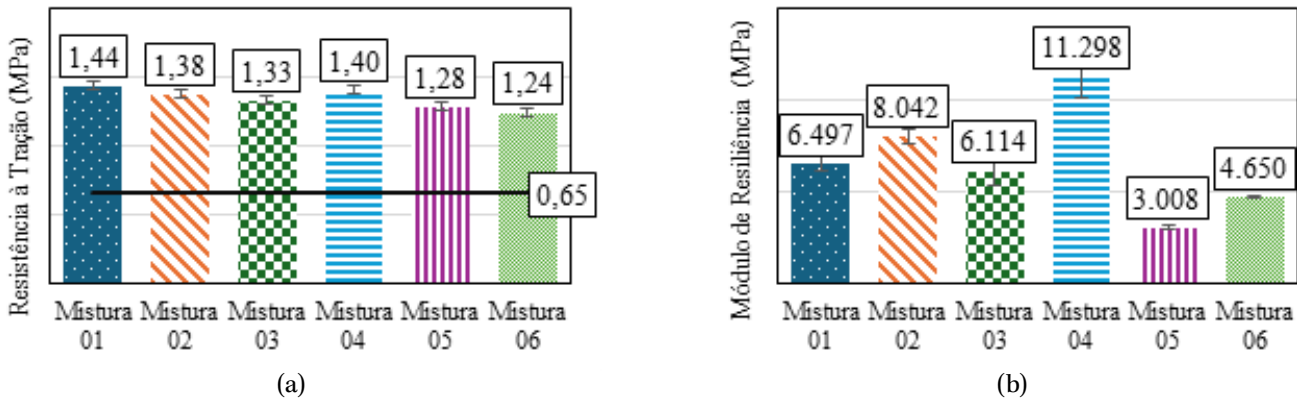


Figura 2. Resultados de: (a) Resistência à Tração (RT) e (b) Módulo de Resiliência (MR)

As misturas asfálticas foram submetidas ao ensaio de fadiga CD, e as curvas de Wöhler que resultaram desses testes são apresentadas na Figura 3. É possível observar que as médias dos valores mínimos e máximos das deformações resilientes específicas foram 5,08E-05 e 9,51E-05, respectivamente, com as misturas de maior rigidez apresentando os maiores valores de vida de fadiga. Ademais, a

Mistura 04 apresentou as menores deformações resilientes, o que corrobora com o fato de que sua capacidade de deformar elasticamente é inversamente proporcional a sua rigidez, tendo, portanto, essa mistura o maior MR dentre as seis testadas. Por fim, a Mistura 05 apresentou as maiores deformações específicas resilientes, tendo o menor MR. Esse comportamento era esperado tendo em vista

que se trata de uma mistura cujo CAP é modificado com polímero elastomérico (60/85-E), consequen-

temente, apresentando maiores respostas elásticas às solicitações do ensaio.

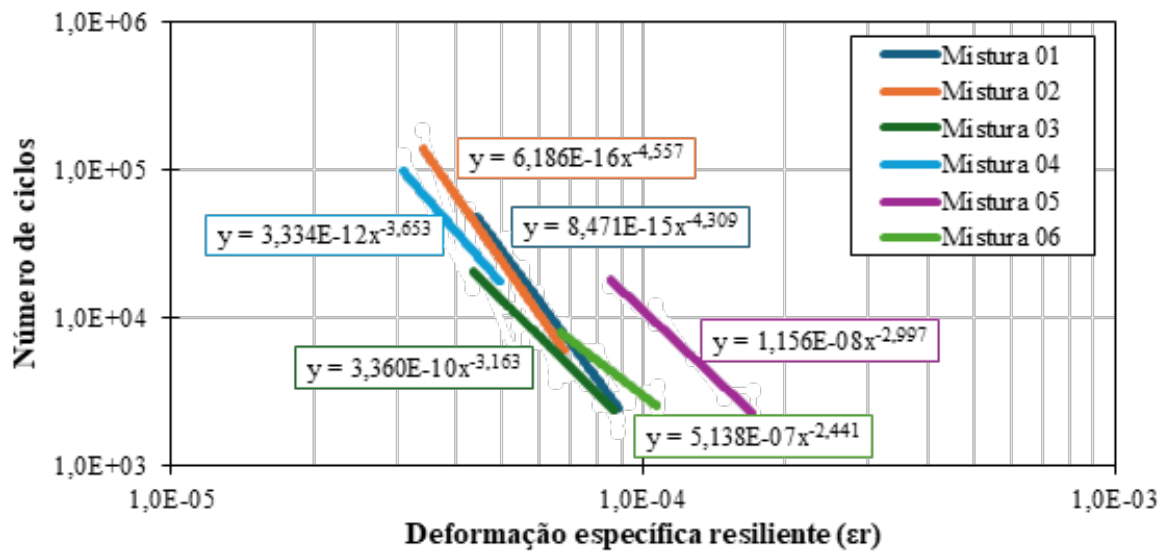


Figura 3. Curvas de Wöhler

Conforme exposto na Tabela 3 e na Figura 4, observa-se a ocorrência de três classes de fadiga para as misturas asfálticas testadas. Apesar de obterem MRs maiores que os demais, as Misturas 01 e 02 obtiveram valores de FFM inferiores. Ao analisar suas composições, é possível observar que ambas possuem composição granulométrica semelhante e variações no Vv de 1%. Também é notório que ambas as misturas obtiveram valores de RT elevados em comparação às demais, o que levanta a hipótese que nessas condições, a rigidez elevada da mistura pode ter interferido negativamente no comportamento das misturas asfálticas.

Ademais, as misturas que se enquadraram na classe 3 possuem particularidades que devem ser esmiuçadas. A Mistura 03 possui FFM maior que as Misturas 01 e 02, com a particularidade de ser a única na faixa granulométrica A, além de possuir o maior TMN (25 mm), bem como MR intermediário quando comparada às demais. Tais características imputam à Mistura 03 caráter intermediário no comportamento de fadiga observado em laboratório. Por outro lado, a Mistura 04 obteve o maior MR, apresentando-se como a mistura mais rígida. Como já abordado anteriormente, esta mistura possui ci-

mento em sua composição, o que explicaria sua maior rigidez. Por pouco essa mistura asfáltica não se enquadrou na classe 4, com seu FFM ficando abaixo de 1,0. Alguns pesquisadores têm atestado a existência de um valor ótimo de teor de ligante asfáltico no qual a mistura obtém desempenho máximo no ensaio de vida de fadiga quando atinge este determinado valor (HARVEY e TSAI, 1996). Inclusive, recentes pesquisas têm proposto o conceito de projeto de misturas balanceadas, também conhecido em inglês como *balanced mix design*, para determinar valores máximos e mínimos que limitam os resultados obtidos por meio ensaios de caracterização mecânica de misturas asfálticas, principalmente em termos de resistência à fadiga e deformação permanente, na etapa de dosagem desses materiais (MERONI *et al.*, 2020; ROCHA *et al.*, 2023).

Quando se analisa os teores de ligante das 6 misturas pesquisadas, observa-se que os menores valores são das Misturas 03 e 04, o que levanta a hipótese que se esses valores fossem mais elevados, até certo ponto, o desempenho à fadiga seria melhor, possivelmente enquadrando a Mistura 04 na classe 4. Essa análise também impacta a Mistura 02, que apesar de ter a segunda maior rigidez das seis

misturas, apresentou, no ensaio de vida de fadiga, desempenho inferior.

Por fim, as misturas que se enquadraram na classe 4 possuem os menores valores de MR, contudo foram compensadas por seus elevados FFMs. Contendo ligante asfáltico modificado (Mistura 05) e teores de ligante de 6,6% e 6,1%, as respectivas

Misturas 05 e 06 apresentaram os menores volume de vazios. Portanto, presume-se que a combinação do ligante modificado (60/85-E), MR baixo, com aproximadamente o já referido teor de ligante ótimo e volume de vazios baixo foram indicadores do bom desempenho em laboratório destas misturas (HARVEY e TSAI, 1996; QUEIROZ *et al.*, 2023).

Tabela 3. FFM, MR e classes de fadiga das misturas asfálticas

Mistura	FFM	MR (MPa)	Classes de Fadiga
01	0,92	6.497	2
02	0,84	8.042	2
03	1,01	6.114	3
04	0,96	11.298	3
05	1,37	3.008	4
06	1,19	4.650	4

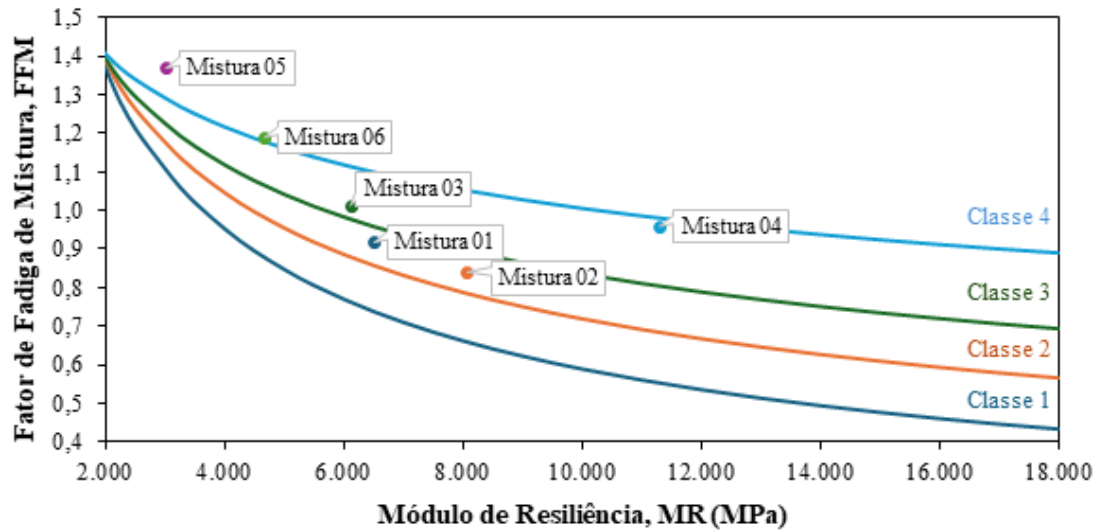


Figura 4. Classes de fadiga

Como observado na Tabela 4 e na Figura 5a, o desempenho quanto ao percentual de trincamento do revestimento asfáltico foi insatisfatório em todas as misturas quando na condição de espessura de 10 cm. A Mistura 01 teve a pior previsão de trincamento, chegando ao limite estabelecido de 30% em apenas 15 meses. Já a Misturas 04 e 05 obtiveram as melhores previsões de trincamento, com 29 e 27 meses necessários para chegar a 30% de área trincada. Essa mesma tendência também é obser-

vada quando a previsão ocorre sobre um revestimento de 15 cm, com destaque para a Mistura 04, que foi a única mistura analisada a atingir percentual de trincamento de área inferior a 30% quando finalizados os 10 anos de projeto (Figura 5b), dados as condições de contorno fixadas nesta simulação. Portanto, para a mistura mais rígida entre as seis analisadas, o limite de 30% de trincamento só foi atingido aos 154 meses, prologando 34 meses o período estipulado em projeto.

Tabela 4. Resultados das simulações no MeDiNa

Mês para 30% de trinca por área		
Mistura	Espessura de 10 cm	Espessura de 15 cm
01	15	32
02	16	43
03	19	37
04	29	154
05	27	68
06	26	56

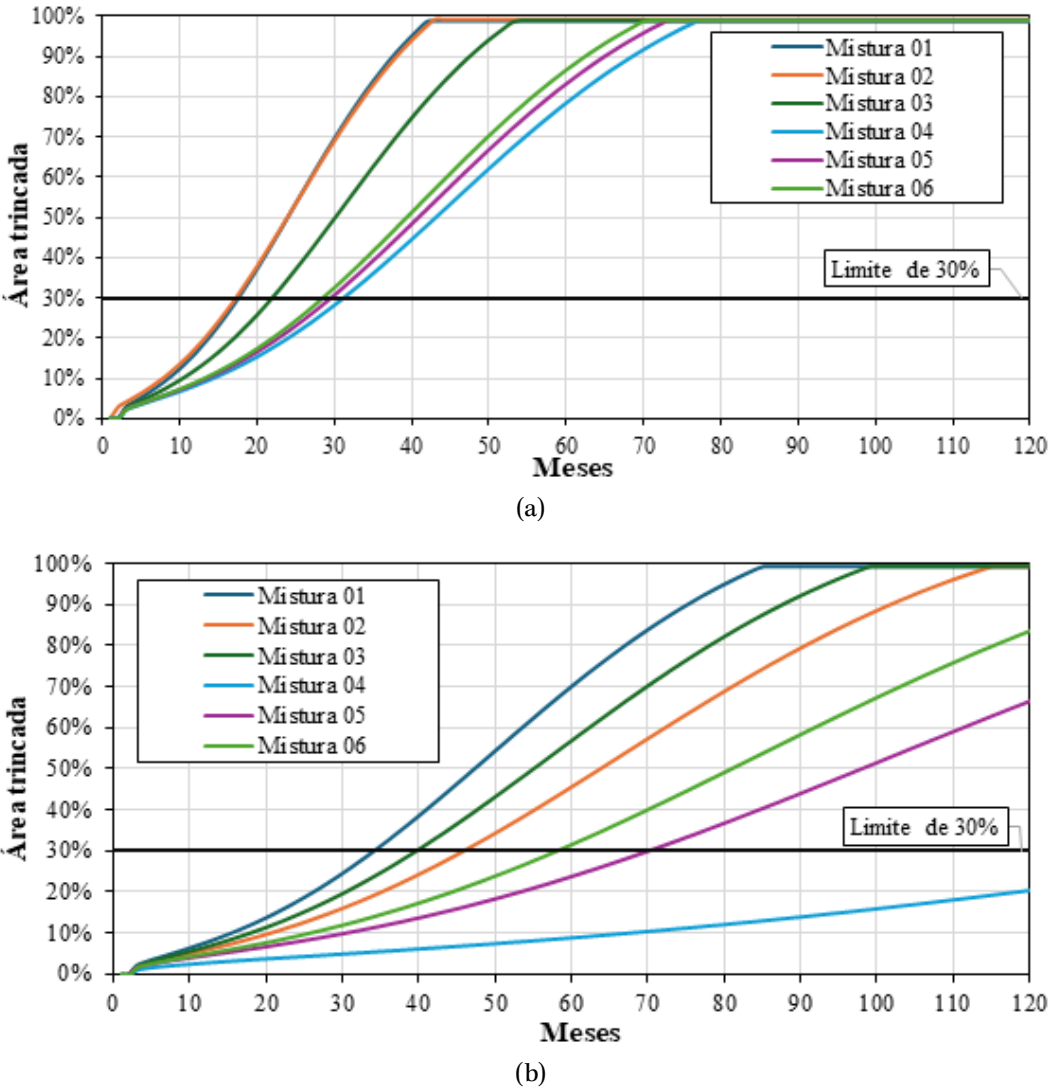


Figura 5. Previsão de área trincada no MeDiNa nas espessuras de revestimento de: (a) 10 cm e (b) 15 cm

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As misturas asfálticas analisadas apresentaram coerência entre suas classificações quanto às classes de fadiga e a previsão da área trincada do pavimento, com as misturas de menor classificação atingindo o limite de 30% mais prematuramente do que as de classe superior. Além disso, este artigo destaca a importância da espessura adequada do revestimento asfáltico para garantir um desempenho eficaz, mesmo com misturas de maior rigidez e resistência à fadiga. Observou-se que espessuras insuficientes, como 10 cm, resultaram em um desempenho insatisfatório em todas as misturas avaliadas, com algumas alcançando níveis de trincamento inaceitáveis em um curto período, como a Mistura 01 em apenas 15 meses. A Mistura 04, apesar de ser a mais resiliente das misturas nordestinas deste artigo, também demonstrou a necessidade de uma espessura adequada para prolongar sua vida útil e manter o trincamento abaixo do limite crítico. Quando avaliada em uma espessura de 15 cm, essa mistura foi a única a apresentar um desempenho satisfatório ao final de 10 anos de projeto.

Portanto, para garantir a eficácia da camada de revestimento asfáltico, é importante considerar sua espessura como um fator decisivo no planejamento e na execução do projeto, especialmente ao lidar com misturas que possuem características mais rígidas e de alta resistência à fadiga. A escolha da espessura adequada pode significar a diferença entre um pavimento com vida útil prolongada e desempenho satisfatório versus um pavimento sujeito a problemas prematuros de trincamento e deterioração. Paralelamente, por meio da avaliação no MeDiNa destas misturas asfálticas usadas em rodovias localizadas em estados da região Nordeste, evidencia-se a necessidade da adoção de medidas que melhorem o desempenho ao dano causado pela fadiga nesses pavimentos, considerando que o uso de pavimentos flexíveis tradicionais pode não está sendo suficiente para atender às demandas de projeto simulados em relação às solicitações de cargas. A adoção de pavimentos rígidos, semirrígidos,

dos, ligantes asfálticos modificados por polímero e fileres ativos apresentam-se como uma possível solução para enfrentar a dinâmica do trincamento precoce, problema este que se apresenta crônico nas infraestruturas viárias nordestinas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) pelo apoio na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bardini, V. S. S., Fernandes Júnior, J. L., Klinsky, L. M. G. Influência do fíler mineral nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas. In: XXVII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte, Belém, 2013.

Colpo, G. B. Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DNIT 031/2006 – ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço.

DNIT 135/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.

DNIT 136/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tracWão por compressão diametral – Método de ensaio.

DNIT 183/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio.

Fritzen, M. A., Franco F. A. C. P., Motta, L. M. G., Ubaldo, M. O. Atualização da função de transferência do dano de fadiga para a área trincada do programa MeDiNa. In: IX Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2019.

Guabiroba, J. V. O. C., Rezende, L. R., Barroso, L. X., Silva, J. P. S. Estudo da fadiga e da deformação permanente de misturas asfálticas produzidas em Goiás. Matéria, vol. 28 (1), 2023.

Harvey, J. T., Tsai, B. W. Effects of asphalt content and air void content on mix fatigue and stiffness. Transportation Research Record, vol. 1543, 1996.

Huang, Y. H. Pavement analysis and design. Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, 1993.

Marodin, E. E. Alternativa de dimensionamento para o pavimento da BR-448 : análise mecânica com aplicação de BGTC. Trabalho de Conclusão de Concurso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

Meroni, F., Flintsch, G. W., Diefenderfer, B. K.,

Diefenderfer, S. D. Application of balanced mix design methodology to optimize surface mixes with high-RAP content. Materials, 13 (24), 2020.

Oliveira, J. A. O. Avaliação do impacto da metodologia FAD-CI de seleção granulométrica na vida de fadiga de misturas asfálticas. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

Preussler, E. S. Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1983.

Queiroz, C. A. V., Visser, A. T. Uma investigação dos módulos de resiliência de revestimentos betuminosos brasileiros. In: XIV Reunião Anual de Pavimentação, João Pessoa, 1978.

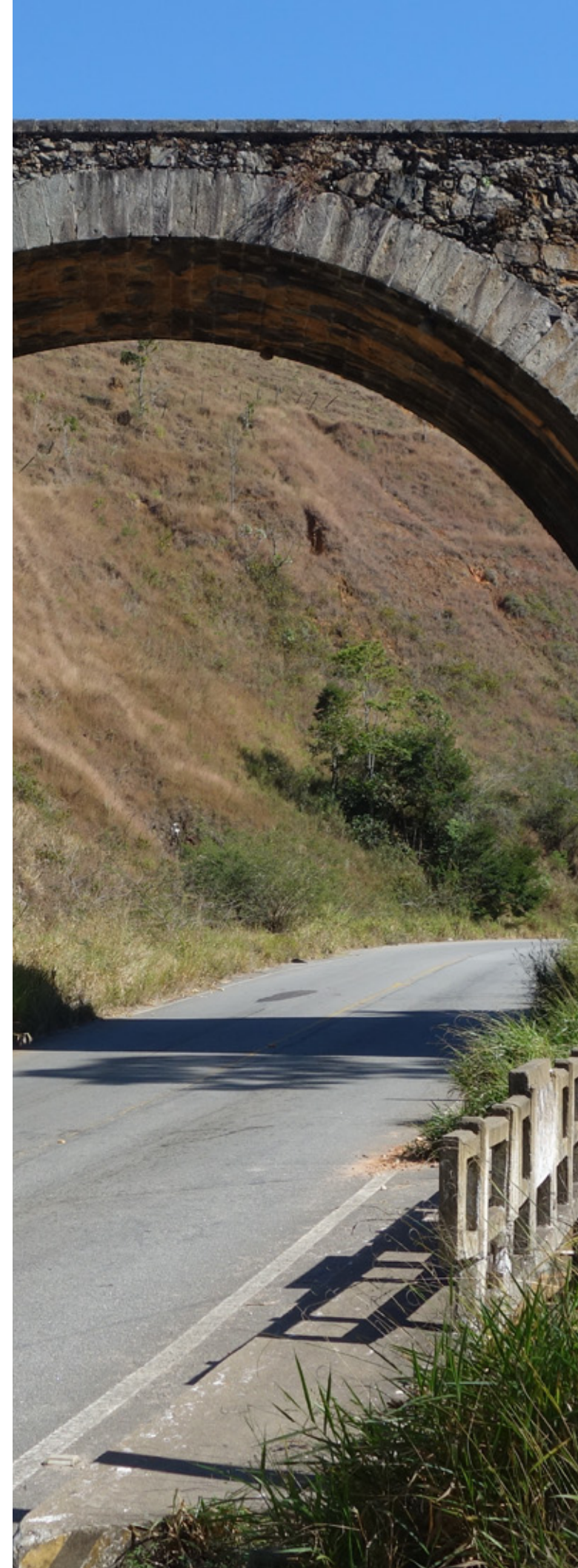
Queiroz, R. F. R., Rodrigues, J. K. G., Patricio, J. D., da Silva, P. H., Carvalho, J. R., Melo Neto, O. de M., Rodrigues, L. G., Lima, R. K. B. Linear viscoelastic properties and fatigue S-VECD based evaluation of polymer-modified asphalt mixtures. Journal of Building Engineering, vol. 75, 2023.

Rocha, M. L., Aragão, F. T. S., Nascimento, L. A. H., Underwood, B. S. Balanced mixture design framework for asphalt mixtures based on index- and performance-volumetrics relationships. Transportation Research Record, vol. 2677(10), 2023.

Santos, A. B. V. Contribuições para um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: Influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

Santos, C. R. G. Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Souza, M. L. Método de projeto de pavimentos flexíveis. IPR, Rio de Janeiro, 1981.



A ESTADUALIZAÇÃO DE VICINAIS: GERAÇÃO DE UM INDICADOR ESPACIAL DE FAVORABILIDADE DE TRECHOS DE RODOVIAS MUNICIPAIS

Vinicius do Prado Capanema¹
Rafael Grinberg Chasles¹
Matheus Amaral Prates¹
Gean Kenid Sifronio Franco¹
José Luiz Fuzaro Rodrigues¹
Carolina Iris Brasil Mariano¹
Bruna Donegá Alves¹
Daniel Matos¹
Anderson Barbosa Esteves¹

¹DER-SP, e-mail: vpcapanema@der.sp.gov.br, rgchasles@der.sp.gov.br; maprates@der.sp.gov.br, gksfranco@der.sp.gov.br, jlfrdrigues@der.sp.gov.br, cibmariano@der.sp.gov.br, bdalves@der.sp.gov.br, dmatos@der.sp.gov.br, andersonesteves@der.sp.gov.br

DOI: 10.21536/abpv.v53.4

RESUMO

Estadualização é o processo administrativo para incorporar trechos de rodovias municipais à malha estadual. Para tal, alguns fatores precisam ser considerados, como conectividade com a malha estadual e com sedes urbanas, aspectos socioambientais e econômicos e existência de infraestrutura mínima, considerando presença de pontes e viadutos em boas condições de conservação, sinalização adequada, faixa de domínio e acostamento existentes. Dada a crescente demanda dos pedidos de estadualização o Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP) desenvolveu um estudo técnico para auxiliar na tomada de decisão, considerando a favorabilidade desses trechos à estadualização. O objetivo do estudo foi gerar um indicador espacial de favorabilidade dos trechos vicinais à estadualização baseado em análise multicritério utilizando *Analytic Hierarchy Process* (AHP) associada a um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os critérios selecionados incluem interligação com demais rodovias, conexão entre municípios, intersecção com área urbana, importância estratégica (critérios de priorização), proximidade com unidade de conservação de proteção integral e de uso sustentável, proximidade com terras indígenas e áreas quilombolas (critérios excludentes). Análises de sensibilidade conduzidas para verificar a robustez dos resultados. Os resultados indicaram que as regiões mais favoráveis estão no centro norte e as menos favoráveis estão na região sudeste do estado. As regiões mais sensíveis se localizam à sudeste e as menos sensíveis no centro-oeste e norte do estado. As variáveis mais sensíveis foram distância de sedes municipais e intersecção com mancha urbana, respectivamente. O método utilizado se mostrou adequado para hierarquização dos trechos permitindo inclusive a avaliação dos resultados.

PALAVRAS-CHAVE: AHP; SIG; análise multicritério; análise de sensibilidade.

ABSTRACT

“Estadualization” is the administrative process of incorporating sections of municipal roads into the state network. To do so, several factors need to be considered, such as connectivity with the state network and urban centers, socio-environmental and economic aspects, and the existence of minimum infrastructure, considering the presence of bridges in good condition, adequate signage, existing right-of-way, and shoulders. Given the increasing demand for requests for estadualization, the Highways Department of São Paulo State (DER/SP) developed a technical study to assist in decision-making, considering the favorability of these sections for estadualization. The study aimed to generate a spatial indicator of favorability for vicinal sections for estadualization based on multicriteria analysis using Analytic Hierarchy Process (AHP) associated with a Geographic Information System (GIS). The selected criteria include interconnection with other highways, connection between municipalities, intersection with urban areas, strategic importance (prioritization criteria), proximity to conservation units and sustainable use, proximity to indigenous lands and “quilombola” areas (exclusion criteria). Sensitivity analyses were conducted to verify the robustness of the results. The results indicated that the most favorable regions are in the north-central and the least favorable are in the southeast region of the state. The most sensitive regions are located in the southeast and the least sensitive in the central-west and north of the state. The most sensitive variables were the distance from municipal seats and intersection with urban areas, respectively. The method used proved to be suitable for the hierarchization of sections, allowing for the evaluation of results.

KEY WORDS: AHP; GIS; multicriteria analysis; sensitivity analysis.

INTRODUÇÃO

A estadualização de trechos vicinais é entendida pelo Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP) como sendo o processo administrativo e legal pelo qual uma rodovia ou estrada, que antes era de responsabilidade de um município, passa para a responsabilidade do estado, por meio da incorporação da via à malha rodoviária estadual. Este processo geralmente leva em consideração aspectos como a conexão do trecho com a malha estadual ou se o trecho conecta sedes urbanas. Além disso, é necessário analisar se o trecho possui importância estratégica, considerando aspectos sociais, econômicos e de desenvolvimento regional e, ainda, se o trecho possui infraestrutura mínima, com presença de elementos como pontes e viadutos em bom estado de conservação, sinalização adequada, faixa de domínio e acostamento existentes.

A crescente demanda por pedidos de estadualização de trechos fez surgir a necessidade da criação de procedimentos operacionais padrão para avaliar a viabilidade desses pedidos. Nesse sentido, o DER/SP, por meio da Coordenadoria de Estudos e Pesquisa da Diretoria de Planejamento (CEP-DP), desenvolveu um estudo técnico para auxiliar a tomada de decisão quanto à favorabilidade dos trechos solicitados ao processo de estadualização. O estudo foi desenvolvido com base em análise multicritério, utilizando a técnica de comparação pareada AHP (Analytic Hierarchy Process) proposta por Saaty (2002).

A AHP é uma técnica de análise multicritério amplamente utilizada em várias áreas do conhecimento e funciona como uma ferramenta de apoio a tomada de decisão. A AHP, associada aos sistemas de informação geográfica (SIGs) tem sido empregada, por exemplo, na escolha de sítios favoráveis para construção de infraestrutura de diferentes naturezas. Estudos como os conduzidos por Pasalari et al. (2019), Sisay; Gebre; Getahun, (2020) e Zarin et al. (2021) utilizaram análise multicritério baseada na AHP combinada com ferramentas de SIG para avaliar a favorabilidade de locais para a construção de aterros sanitários no Irã, Etiópia e Paquistão, respectivamente. Da mesma forma, Ayodele et al.

(2018) e Mayaki; Adedipe; Lawal (2018) aplicaram a mesma abordagem para identificar locais favoráveis para a instalação de parques eólicos na Nigéria e Bangladesh, respectivamente. Mayaki; Adedipe; Lawal (2018) consideraram fatores como velocidade média do vento, proximidade de aeroportos, demanda de energia e rotas marítimas. Já os estudos de Ayodele et al. (2018) levaram em conta critérios como velocidade do vento, topografia, uso da terra, áreas protegidas, áreas urbanizadas, distância de aeroportos e estradas, entre outros.

Todos os estudos voltados para identificar áreas propícias para a construção de diversas formas de infraestrutura compartilham a fase de seleção dos critérios relacionados a cada objeto de análise. A utilização da análise multicritério em conjunto com ferramentas SIG pode ser aplicada em uma variedade de campos acadêmicos e práticos, visando fornecer suporte à tomada de decisão. Essa abordagem é altamente flexível e facilmente adaptável a diferentes tipos de estudos e às peculiaridades geográficas dos locais em análise. No presente estudo, a AHP associada às ferramentas de SIG foi adaptada para auxiliar na hierarquização da favorabilidade de trechos de rodovias vicinais à estadualização, ou seja, quais são os trechos vicinais mais favoráveis para incorporação à malha estadual, considerando diferentes critérios.

Nesse contexto, as principais questões a serem respondidas neste estudo são: (i) quais são os critérios mais relevantes para a estadualização de um trecho vicinal? (ii) quais as regiões mais e menos favoráveis do estado de São Paulo para a estadualização de trechos, considerando os critérios selecionados? e (iii) qual a sensibilidade dos resultados relacionados à favorabilidade dos trechos decorrentes de possíveis alterações dos pesos e ranqueamentos de variáveis da AHP? A respostas destas questões representam a principal contribuição deste estudo, que consiste na apresentação de uma abordagem metodológica estruturada, visando identificar as áreas mais favoráveis para estadualização de trechos vicinais. Essa metodologia pode ser reproduzida em outras regiões, contanto que os critérios e pesos sejam ajustados de acordo com as

características específicas de cada caso.

Para responder a essas questões, o presente estudo tem como objetivo estruturar uma metodologia multicritério baseada na AHP e em dados geográficos para identificar e ranquear as áreas mais favoráveis à estadualização por meio da geração de um indicador espacial de favorabilidade. Para tal, foi necessário: (i) identificar os principais critérios relacionados à estadualização de trechos vicinais; (ii) hierarquizar e gerar pesos para as variáveis, obtidas a partir dos critérios identificados, utilizando a técnica AHP; (iii) obter o indicador espacial de favorabilidade utilizando álgebra de mapas e os pesos da AHP; e (iv) realizar a análise de sensibilidade do método para verificar a robustez dos resultados.

Tabela 1 - Base de dados utilizados, contendo as categorias de agrupamento, formato do dado e a fonte (Produção dos autores, 2024).

CRITÉRIO	CLASSIFICAÇÃO	DADO	FONTE
Interligação com rodovias estaduais ou federais	Integração com o Sistema Rodoviário Estadual (SRE)	Vetor de linhas da malha viária estadual	SIRGEO (2023)
Conexão entre municípios		Vetor de pontos com sedes municipais	IBGE (2023)
Intersecção com área urbana		Vetor de polígonos da macha urbana estadual	IBGE (2019)
Importância estratégica	Socioeconômico	Vetor de polígono dos municípios contendo a produção (em toneladas) agropecuária	IGC (2021) e IBGE (2022)
		Vetor de pontos de escolas rurais	INEP (2023)
Proximidade com Unidade de Conservação de Proteção Integral (UC-PI)	Ambiental	Vetor de polígonos das UC-PIs	ICMBio (2023) e DATAGEO (2023)
Proximidade com Unidade de Conservação de Uso Sustentável (UC-US)		Vetor de polígonos das UC-USs	ICMBio (2023) e DATAGEO (2023)
Proximidade com Terra Indígena (TI)		Vetor de polígonos das TIs	FUNAI (2023)
Proximidade com Áreas Quilombolas (AQ)		Vetor de polígonos das AQs	INCRA (2023)

METODOLOGIA

Dados

A base de dados inclui dados de fontes diversas, como por exemplo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP), Instituto Geográfico e Cartográfico do estado de São Paulo (IGC), dentre outros. Os dados foram agrupados em três categorias: integração com o Sistema Rodoviário Estadual (SRE), socioeconômicos e ambientais, como pode ser observado na Tabela 1.

A seleção dos dados foi pautada principalmente na relação que eles possuem com o objeto de estudo. Por exemplo, o vetor de pontos das sedes municipais serve para verificar a proximidade do trecho entre duas sedes municipais e, portanto, possibilita verificar se este trecho pode promover interligação entre essas sedes municipais. O vetor de escolas rurais serve para avaliação dos trechos que promovem acesso à essas escolas, uma vez que dentre outros, os objetivos da estadualização de trechos é melhorar o acesso e promover desenvolvimento de comunidades locais. 50s critérios ambientais foram selecionados, pois áreas protegidas ou com alguma restrição representam desafios para o DER do ponto de vista de operação e manutenção rodoviária.

Procedimentos Metodológicos

A partir do conjunto de dados descrito Tabela 1 foram geradas as variáveis para representar os critérios selecionados. Essas variáveis são mapas contínuos em formato matricial¹ com resolução espacial de 50 metros, ou seja, cada pixel do mapa tem 2500m² e armazena um valor específico relacionado a unidade de medida de cada variável gerada. Na Tabela 2 é possível observar a descrição das variáveis geradas a partir dos dados, bem como a premissa para sua inclusão no estudo.

¹ Na representação matricial, o espaço geográfico é tratado como uma superfície plana, onde cada quadrícula (pixel) está associada a uma porção do terreno. A resolução do sistema matricial é dada pela razão entre o tamanho do pixel no mapa e a área coberta por ele no terreno (CÂMARA, 2001).

Tabela 2 - Variáveis e premissas utilizadas no estudo para obtenção do indicador espacial de favorabilidade (Produção dos autores, 2024).

VARIÁVEL	PREMISSA
Distância de SP e BR	Quanto menor a distância de uma SP ou uma BR, maior será a favorabilidade do trecho da vicinal à estadualização, pois maior a possibilidade de interligação com uma SP ou BR (DER, equipe técnica).
Distância das sedes municipais	Quanto menor a distância entre duas sedes municipais, maior será a favorabilidade do trecho da vicinal à estadualização, pois representa maior possibilidade de conexão entre duas sedes municipais (DER, equipe técnica).
Intersecção com mancha urbana	Quando houver intersecção com a mancha urbana, menor será a favorabilidade do trecho da vicinal à estadualização, pois a intersecção com mancha urbana representa desafios desfavoráveis ao DER do ponto de vista de conservação e manutenção das vias (DER, equipe técnica).
Produção agropecuária municipal	Quanto maior a produção agropecuária, maior será a favorabilidade do trecho da vicinal à estadualização, pois melhores condições viárias são demandadas para o escoamento da produção (DER, equipe técnica).
Densidade de escolas	Quanto maior a densidade de escolas, maior será a favorabilidade do trecho da vicinal à estadualização, pois favorecerá melhoria das condições de transporte para escolas, favorecendo as comunidades locais (DER, equipe técnica).
Distância de UC-PIs	Quanto maior a distância de uma UC-PI, maior será a favorabilidade do trecho da vicinal à estadualização, pois a abertura e/ou melhoria de estradas/rodovias podem promover impactos socioambientais locais negativos (BECKER, 1982; MATRICARDI et al., 2010; PFAFF et al., 2009).
Distância de UC-US	Quanto maior a distância de uma UC-US, maior será a favorabilidade do trecho da vicinal à estadualização, pois a abertura e/ou melhoria de estradas/rodovias podem promover impactos socioambientais locais negativos (BECKER, 1982; PFAFF et al., 2009; MATRICARDI et al., 2010).
Distância de TIs	Quanto maior a distância de uma Tis, maior será a favorabilidade do trecho da vicinal à estadualização, pois a abertura e/ou melhoria de estradas/rodovias podem promover impactos socioambientais locais negativos (BECKER, 1982; PFAFF et al., 2009; MATRICARDI et al., 2010).
Distância de AQs	Quanto maior a distância de AQ, maior será a favorabilidade do trecho da vicinal à estadualização, pois a abertura e/ou melhoria de estradas/rodovias podem promover impactos socioambientais locais negativos (BECKER, 1982; PFAFF et al., 2009; MATRICARDI et al., 2010).

Cálculo das variáveis a partir dos critérios

A partir dos dados, em formato vetorial, foram geradas as variáveis em formato matricial utilizando diferentes operadores. O cálculo das variáveis representativas dos critérios foi realizado utilizando operadores distintos disponíveis em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Cada pixel da variável gerada armazena um valor único proveniente

te do resultado da aplicação de um operador. A resolução espacial de todas as variáveis geradas é de 50 metros, ou seja, cada valor proveniente da aplicação do operador selecionado é armazenado em uma unidade espacial de 50 m². Esta resolução foi selecionada para representar um equilíbrio satisfatório entre escala de mapeamento e custo computacional. Na Tabela 3 são apresentados os operadores aplicados a cada um dos dados para obtenção das variáveis.

Tabela 3 - Dados e operadores utilizados para obtenção das variáveis (Produção dos autores, 2024).

DADO	OPERADOR	VARIÁVEL	DETALHES DA MEDIDA
Vetor de linhas da malha viária estadual	Distância euclidiana	Distância de SP e BR	O valor do pixel corresponde à distância entre o centroide do pixel interseccionado pelo vetor e o centroide do pixel vizinho, de 50 em 50 metros.
Vetor de pontos com sedes municipais		Distância das sedes municipais	
Vetor de polígonos da malha urbana estadual	Booleano (presença e ausência)	Intersecção com malha urbana	O valor do pixel será zero quando na área ocupada pela malha urbana e um nas demais áreas.
Vetor de polígono dos municípios contendo a produção (em toneladas) agropecuária	Agregação	Produção agropecuária municipal	O valor do pixel será o valor da produção agropecuária do município em megatoneladas. Todos os pixels do município terão o mesmo valor.
Vetor de pontos de escolas rurais	Densidade	Densidade de escolas	O valor do pixel será a quantidade de pontos de escolas rurais em 1km².
Vetor de polígonos das UC-PIs	Distância euclidiana	Distância de UC-PIs	O valor do pixel corresponde à distância entre o centroide do pixel interseccionado pelo vetor e o centroide do pixel vizinho, de 50 em 50 metros.
Vetor de polígonos das UC-USs		Distância de UC-US	
Vetor de polígonos das TIs		Distância de TIs	
Vetor de polígonos das AQs		Distância de AQs	

Por meio da aplicação dos operadores foram obtidas as variáveis em formato matricial contínuo. Essas variáveis são medidas objetivas, distribuídas continuamente no espaço de 50 em 50 metros. As

Figuras 1, 2 e 3 representam a obtenção das variáveis a partir dos dados selecionados para representar os critérios.

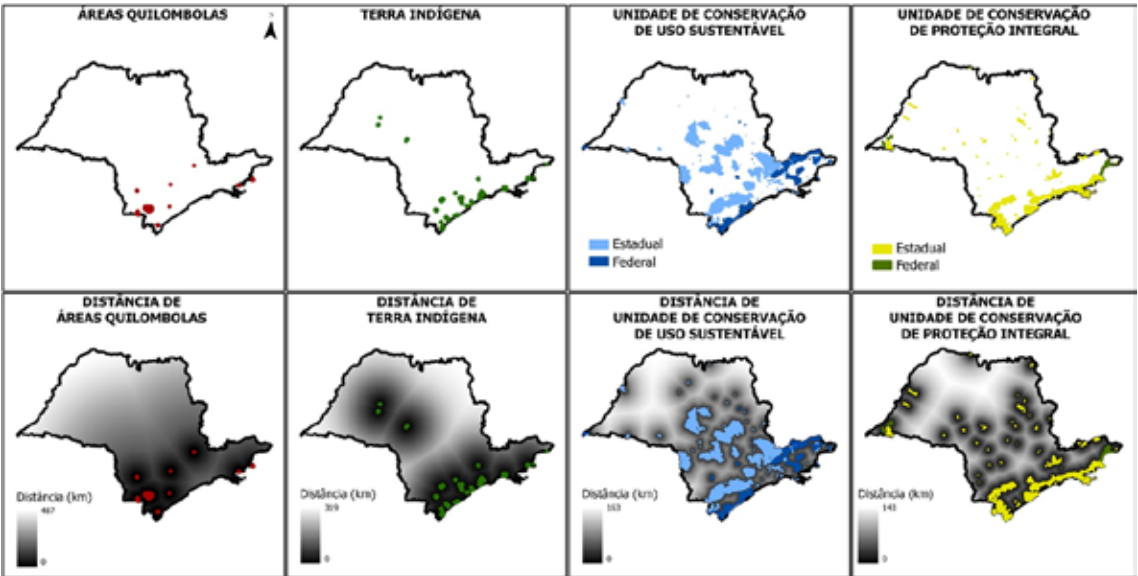


Figura 1 - Obtenção das variáveis a partir dos dados representantes dos critérios ambientais (Produção dos autores, 2024).

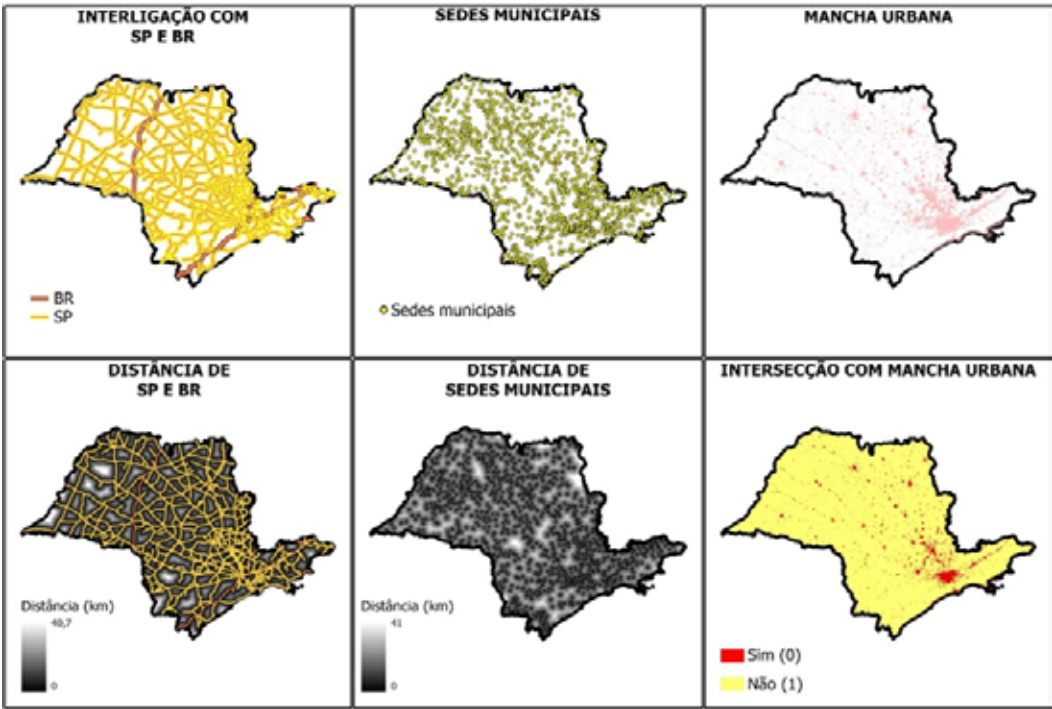


Figura 2 - Obtenção das variáveis a partir dos dados representantes dos critérios de integração com o SRE (Produção dos autores, 2024).

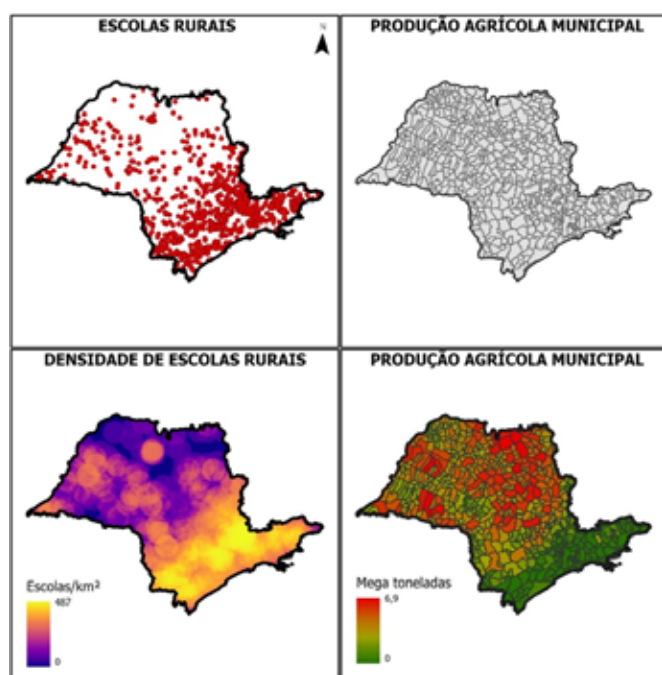


Figura 3 - Obtenção das variáveis a partir dos dados representantes dos critérios socioeconômicos (Produção dos autores, 2024).

Após a aplicação dos operadores, todas as variáveis foram reescaladas para valores entre zero e um utilizando um operador de transformação linear em que o valor máximo da variável é igualado a 1 e o valor mínimo a zero. É importante destacar que as variáveis cuja relação com o objeto de estudo é inversa, foram invertidas subtraindo-se 1 da variável. Por exemplo, a variável *distância euclidiana de SP e BR*, as menores distâncias representam as áreas mais favoráveis à estadualização e os valores numéricos para representar essa favorabilidade devem ser maiores. Nesse sentido, subtrai-se 1 da variável para inverter os valores do mapa. Assim, as áreas mais próximas de SP e BR recebem valores próximos de 1 e áreas mais distantes, valores próximos a zero.

Aplicação da Análise Hierárquica de Processo (AHP)

A Análise Hierárquica de Processo (AHP) é uma abordagem de comparação entre critérios que busca ponderar diferentes elementos para alcançar um objetivo geral. Neste processo, os critérios são comparados entre si e atribuídos pesos correspondentes. A condução da AHP segue etapas claras: i) identi-

cação do problema; ii) estruturação da hierarquia de critérios; iii) comparação pareada entre esses critérios; e iv) determinação dos pesos de importância global com base nas comparações pareadas.

Foram aplicados questionários às 14 diretorias regionais do DER/SP, a fim de obter suporte à hierarquização das variáveis obtidas a partir dos critérios, das quais 10 responderam. Este passo auxiliou na construção da matriz de comparação pareada, onde as variáveis foram hierarquizadas para obtenção dos pesos globais. A hierarquização das variáveis é realizada por meio de comparações em pares, onde são atribuídas intensidades de importância em uma escala de 1 a 9. Nessa escala, o valor 1 indica igual importância entre as variáveis comparadas, enquanto o valor 9 indica extrema importância de uma variável sobre a outra. A consistência da hierarquização das variáveis é avaliada por meio da Razão de Consistência (RC). Uma RC igual ou inferior a 0,1 indica hierarquização lógica das variáveis, enquanto valores superiores a 0,1 sugerem possíveis problemas de inconsistência, indicando uma hierarquização não lógica dos critérios.

Após a hierarquização e a análise da RC, foram calculados pesos globais para cada variável. Esses pesos foram aplicados na construção de um mapa com um indicador espacial, utilizando álgebra de mapas e

um operador de média ponderada. O mapa resultante apresenta valores variando entre zero e 1, onde valores próximos de zero indicam áreas menos favoráveis e valores próximos de 1 indicam áreas mais favoráveis à estadualização de trechos das vicinais. Além disso, análises de sensibilidade da AHP foram conduzidas para avaliar os efeitos de mudanças nos pesos globais sobre os resultados obtidos.

Análise de Sensibilidade

As análises de sensibilidade foram empregadas com o objetivo de examinar os potenciais impactos decorrentes da modificação dos pesos obtidos pela AHP no mapa de indicador de favorabilidade de trechos à estadualização. Neste estudo, foram adotadas duas abordagens distintas para a análise de sensibilidade. A primeira baseou-se na metodologia proposta por Macul (2019), que mapeia as áreas geográficas mais e menos sensíveis a alterações nos pesos da AHP. A segunda abordagem seguiu a metodologia proposta por Morris (1991), que identifica quais variáveis são mais ou menos sensíveis a mudanças nos pesos.

Na abordagem delineada por Macul (2019), a variação dos pesos da AHP é conduzida somando e subtraindo 0,5 aos pesos originais. Essa simulação é repetida 1.000 vezes para gerar 1.000 conjuntos distintos de pesos, os quais são então avaliados quanto à Razão de Consistência (RC). Aqueles conjuntos de pesos que resultam em RC superior a 0,1 são descartados, enquanto os restantes são utilizados para calcular médias ponderadas. Em seguida, é determinada a diferença entre o primeiro e o terceiro quartil das médias ponderadas simuladas, proporcionando uma medida da sensibilidade dos pesos. Quanto maior a discrepância entre esses quartis, maior a sensibilidade do mapa resultante à variação dos pesos. Posteriormente, a diferença entre os quartis é espacializada em um plano celular para demonstrar as áreas mais e menos sensíveis à alteração dos pesos na região de estudo.

Na abordagem descrita por Morris (1991), também conhecida como método de efeito elementar, são realizadas aproximações discretas do valor médio da matriz das derivadas parciais das saídas do modelo em relação a cada uma das variáveis de entrada do modelo. A variação dos pesos é conduzida conforme o número de simulações determinadas pelo usuário. As médias e os desvios padrão das variações são cal-

culados para determinar quais variáveis são mais sensíveis à alteração dos pesos. No presente estudo, foram conduzidas simulações com 1000 conjuntos de pesos diferentes, seguido do cálculo das médias e desvios padrão. Dessa forma, o método é capaz de identificar quais fatores são mais e menos sensíveis à alteração dos pesos.

Aplicabilidade dos Resultados

Para determinar a favorabilidade dos trechos das vicinais à estadualização, considerando o indicador espacial, utilizou-se um algoritmo de extração de estatística zonal. A partir da base de estradas vicinais do estado de São Paulo, medidas de tendência central foram extraídas, tais como a média, moda e a mediana. As três medidas de tendência central foram analisadas e convencionou-se a média com a mais adequada para representar a favorabilidade do trecho. Como o mapa com o indicador espacial de favorabilidade foi produzido com resolução espacial de 50 metros, todo trecho com extensão superior a esta medida pode apresentar variabilidade de favorabilidade e por esta razão as estatísticas zonais foram computadas. Assim, a favorabilidade do trecho é representada pela média dos valores dos pixels que o trecho intersecta no mapa de favorabilidade.

RESULTADOS

Indicador Espacial de Favorabilidade à Estadualização de Trechos Vicinais

O primeiro resultado são os pesos globais obtidos a partir da matriz de comparação pareada da AHP, que podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Relação de pesos globais por variável obtidos por meio da AHP (Produção dos autores, 2024).

VARIÁVEIS	PESOS
Distância de UC-PIs	0,0378
Distância de TIs	0,0157
Distância de AQs	0,0242
Distância de UC-USs	0,0572
Distância de SP e BR	0,0812
Distância de sedes municipais	0,2890
Intersecção com mancha urbana	0,2222
Densidade de escolas	0,1265
Produção agrícola municipal	0,1463
Razão de Consistência	0,074

Os resultados da aplicação da AHP revelaram que as variáveis com maior peso são distância sedes municipais, intersecção com mancha urbana, densidade de escolas e produção agrícola municipal, respectivamente. A razão de consistência igual a 0,074 indica que as variáveis foram logicamente hierarquizadas e, portanto, os pesos puderam ser utilizados para gerar o mapa com o indicador espacial de favorabilidade de trechos à

estadualização. A partir dos resultados obtidos com a álgebra de mapas e dos pesos da AHP, foram realizadas as análises de sensibilidades dos resultados utilizando duas abordagens específicas. A primeira, proposta por Macul (2019), o resultado é um mapa contendo as áreas mais e menos sensíveis a alteração dos pesos da AHP. Os mapas de favorabilidade e sensibilidade podem ser observados na Figura 4a e 4b.

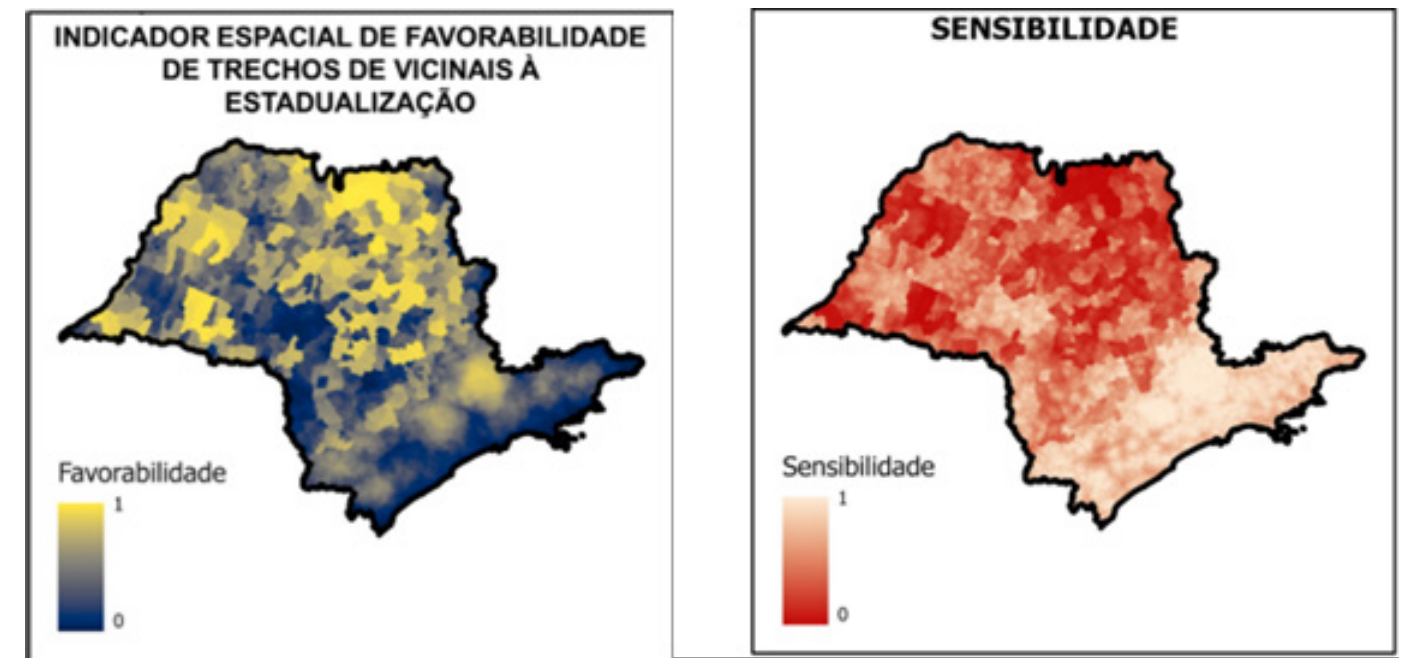


Figura 4 - Mapa do indicador espacial de favorabilidade de trechos de vicinais à estadualização e mapa de sensibilidade (Produção dos autores, 2024).

Os resultados do indicador espacial de favorabilidade indicam que as regiões mais favoráveis à estadualização, considerando uma escala mais global, estão concentradas no centro norte do estado e as menos favoráveis estão concentradas na parte sudeste. É importante destacar que este mapa foi produzido com uma resolução espacial de 50 metros e que, portanto, análises mais locais podem ser conduzidas a fim de capturar a variabilidade da favorabilidade.

As áreas menos sensíveis se localizam na parte centro-oeste e norte do estado. Isso dignifica dizer que, caso a hierarquização das variáveis mude e os pesos da AHP sejam alterados, muito provavelmen-

te o resultado do mapa com o indicador espacial seja bem semelhante ao atual. O oposto ocorre na parte sul e sudeste, ou seja, caso haja alteração dos pesos da AHP, é provável que as regiões que mais sofram alteração dos resultados do mapa resultante sejam essas.

Além da abordagem de avaliação dos resultados proposta por Macul (2019), também foi realizada a análise baseada na metodologia proposta por Morris (1991), que identifica quais são as variáveis mais sensíveis a alteração de pesos da AHP. A Figura 7 mostra os resultados da aplicação desta abordagem.

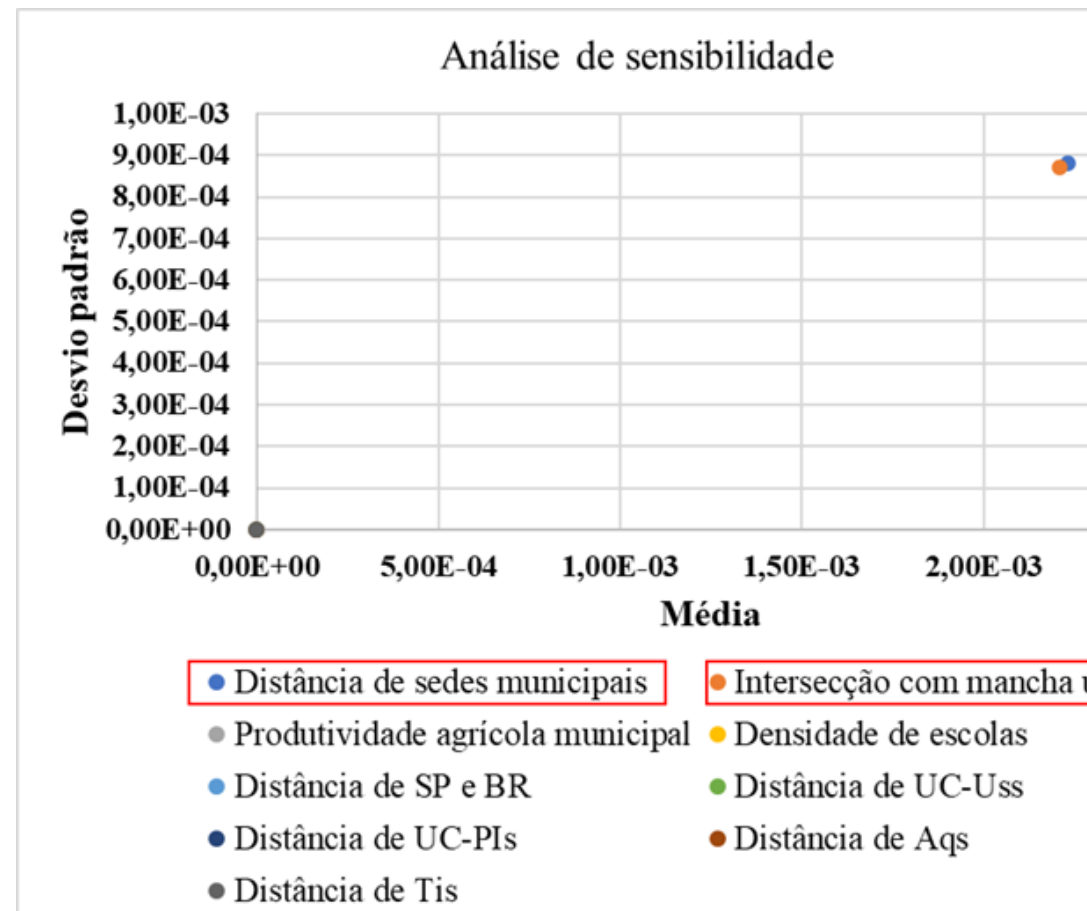


Figura 5 - Análise de sensibilidade de acordo com a abordagem proposta por Morris (1991) (Produção dos autores, 2024).

A análise da Figura 5 mostra que as variáveis com maior média e desvio padrão após a realização de 1000 simulações com pesos diferentes são a distância de sedes municipais e intersecção com mancha urbana. Isso significa que, caso os pesos da AHP sejam alterados, as variáveis que terão maior influência nos resultados do mapa indicador de favorabilidade serão a distância de sedes municipais e intersecção com mancha urbana. É importante destacar que esta alteração possivelmente será reduzida, uma vez que os valores de média e desvio padrão são muito próximos a zero. Porém, considerando todo o conjunto de variáveis, a distância de sedes municipais e intersecção com mancha urbana representam as maiores variações e pode ser importante para o tomador de decisão conhecer quais são os critérios responsáveis por possíveis alterações no mapa resultante.

Aplicabilidade Prática do Método

Após a obtenção do mapa com o indicador espacial de favorabilidade de trechos a estadualização e a avaliação dos resultados, aplicou-se o mapa de favorabilidade à toda a malha de vicinais do estado. Foram extraídas as médias de favorabilidade de todos os trechos das vicinais do estado gerando uma classificação geral dos trechos quanto à favorabilidade. Esta classificação pode ser observada na Figura 8.

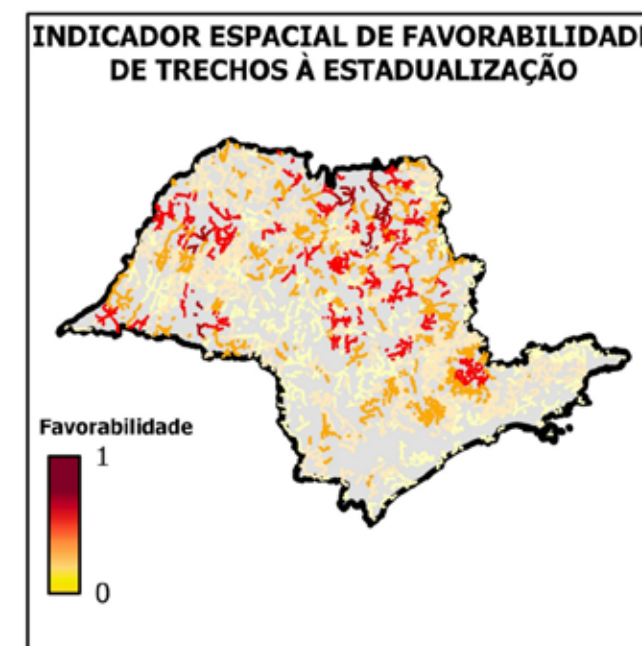


Figura 6 - Aplicabilidade do método à malha estadual de vicinais (Produção dos autores, 2024).

A análise da Figura 6 revela que, considerando uma escala mais global dos resultados, os trechos mais favoráveis à estadualização encontram-se espalhados ao longo de todo o estado. Pode-se destacar áreas no médio norte, no oeste, centro e sudeste do estado. É importante destacar que o mapa com o indicador espacial de favorabilidade foi gerado com uma resolução espacial de 50 metros, ou seja, análises locais podem ser realizadas, auxiliando a hierarquização de trechos em escalas correspondentes às Diretorias Regionais do DER, às microbacias, aos municipais ou até às microrregiões do município, por exemplo. Isto representa uma grande vantagem do ponto de vista de na análise da favorabilidade de trechos, pois permite aos tomadores de decisão realizarem avaliações em escalas locais, considerando as características individuais da região de análise.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método apresenta uma abordagem sistemática e eficiente de suporte à tomada de decisão baseada em análise multicritério, pois é um método versátil, permitindo a inclusão e exclusão de critérios bem como a hierarquização de acordo com as demandas necessárias. Outra vantagem interessante é a oportunidade de explorar diversas alternativas de hierarquização de critérios, permitindo ao tomador de decisões visualizar quantos resultados forem possíveis.

A análise de sensibilidade empregada permitiu avaliar os efeitos da subjetividade associada à hierarquização, possibilitando, inclusive, quantificá-los para garantir maior robustez dos resultados. O método se mostrou adequado para auxílio à tomada de decisão quanto a determinação dos trechos mais ou menos favoráveis à estadualização, pois apresentou hierarquização lógica das variáveis e a análise de sensibilidade permitiu avaliar as áreas mais e menos sensíveis às possíveis alterações dos pesos da AHP.

É importante destacar que a abordagem realizada neste estudo representa as etapas iniciais do processo de estadualização, contribuindo principalmente para a redução da quantidade de trechos a serem avaliados nas etapas finais de estadualização. Outras questões processuais, administrativas e locais devem ser tratadas de maneira individualizada para garantir o sucesso na tomada de decisão relacionada à estadualização de trechos. Por fim, vale ressaltar que o presente método não substitui a expertise dos tomadores de decisão, mas funciona como suporte adicional do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYODELE, T. R.; OGUNJUYIGBE, A. S. O.; ODI-GIE, O.; MUNDA, J. L. A multi-criteria GIS based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: The case study of Nigeria. *Applied Energy*, [S. l.], v. 228, p. 1853–1869, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.051. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191831078X>.

BECKER, Bertha K. Geopolítica da Amazônia: a Nova Fronteira de Recursos. Rio de Janeiro: Zahar, 1982.

CÂMARA, G. ; Davis, C. ; Monteiro, A. M. ; D'Alge, J. C. Conceitos Básicos em Ciências da Geoinformação. Em: *Introdução à Ciência da Geoinformação*. 2a Edição ed. [s.l: s.n.].

MACUL, Mateus de Souza. Índice de valoração da terra e desmatamento em uma região de fronteira agropecuária na Amazônia: região de Novo Progresso, Pará. 2019. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

MATRICARDI, Eraldo A. T.; SKOLE, David L.; PEDLOWSKI, Marcos A.; CHOMENTOWSKI, Walter; FERNANDES, Luis Claudio. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, [S. l.], v. 114, n. 5, p. 1117–1129, 2010. DOI: 10.1016/j.rse.2010.01.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.01.001>.

MAYAKI, E. A.; ADEDIPE, O.; LAWAL, S. A. Multi-Criteria Evaluation of the Appropriate Offshore Wind Farm Location in Nigeria. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, [S. l.], v. 413, p. 012041, 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/413/1/012041. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/413/1/012041>.

MORRIS, Max D. Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 161, 1991. DOI: 10.2307/1269043.

PASALARI, Hasan; NODEHI, Ramin Nabizadeh; MAHVI, Amir Hossein; YAGHMAEIAN, Kamyar; CHARRAHI, Zabihalah. Landfill site selection using

a hybrid system of AHP-Fuzzy in GIS environment: A case study in Shiraz city, Iran. *MethodsX*, [S. l.], v. 6, p. 1454–1466, 2019. DOI: 10.1016/j.mex.2019.06.009.

PFAFF, Alexander; BARBIERI, Alisson; LUDEWIGS, Thomas; MERRY, Frank; PERZ, Stephen; REIS, Eustaquio. Road impacts in Brazilian Amazonia. Em: [s.l: s.n.]. p. 101–116. DOI: 10.1029/2008GM000737. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2008GM000737>.

SAATY, T. L. Decision making with the Analytic Hierarchy Process. *Scientia Iranica*, [S. l.], 2002. DOI: 10.1504/ijssci.2008.017590.

SISAY, Getahun; GEBRE, Sintayehu Legesse; GETAHUN, Kefelegn. GIS-based potential landfill site selection using MCDM-AHP modeling of Gondar Town, Ethiopia. *African Geographical Review*, [S. l.], v. 00, n. 00, p. 1–20, 2020. DOI: 10.1080/19376812.2020.1770105.

ZARIN, Riaz; AZMAT, Muhammad; NAQVI, Salman Raza; SADDIQUE, Qaisar; ULLAH, Saif. Landfill site selection by integrating fuzzy logic, AHP, and WLC method based on multi-criteria decision analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, [S. l.], v. 28, n. 16, p. 19726–19741, 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-11975-7.



USO DE EMULSÃO ASFÁLTICA NA REDUÇÃO DA POROSIDADE DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

Verônica Janaína Melo Barreto Nunes¹
Fernando Silva Albuquerque

¹ Universidade Federal de Sergipe,
janaina.melo.eng@gmail.com;
albuquerque.fs@academico.ufs.br.

DOI: W10.21536/abpv.v53.5

RESUMO

Com intuito de avaliar a influência da emulsão asfáltica na redução da porosidade da brita graduada tratada com cimento (BGTC), a presente pesquisa analisou a absorção e índice de vazios de misturas de BGTC com incorporação de emulsão asfáltica de ruptura rápida. Os resultados indicaram que a utilização de 0,5% de emulsão asfáltica RR1-C em misturas de BGTC promove misturas menos porosas e mais compactas, com ligações mais fortes entre argamassa e agregado. As imagens obtidas por microscopia de varredura (MEV) corroboraram com os resultados dos ensaios de absorção e índice de vazios. Análises complementares acerca do comportamento mecânico das misturas apontaram que as misturas com acréscimo de 0,5% de RR-1C apresentavam maiores resistências em comparação com misturas com os mesmos teores de cimento tipo CP II-F 32 e sem incorporação da emulsão asfáltica, sinalizando relação existente entre a redução da porosidade e benefícios em termos de resistência das misturas cimentadas, embora essa relação não seja direta e influenciada por outras variáveis. Apesar de conferir resistência à BGTC, não foi observado um correspondente acréscimo de rigidez nas misturas investigadas. Os resultados de módulo dinâmico e de resiliência, aos 28 dias de cura, indicaram uma redução da rigidez nas misturas em que foi inserida a emulsão de ruptura rápida.

PALAVRAS-CHAVE: BGTC; emulsão asfáltica, porosidade, comportamento mecânico.

ABSTRACT

With the aim of assessing the influence of asphalt emulsion on the reduction of porosity in cement-treated crushed stones (CTCS), this research analyzed the absorption and void content of CTCS mixtures incorporating rapid-breaking asphalt emulsion. The results indicated that the use of 0.5% of RR1-C asphalt emulsion in CTCS mixtures promotes less porous and more compact mixes, with stronger bonds between mortar and aggregate. Images obtained through scanning electron microscopy (SEM) supported the results of absorption and void content tests. Additional analyses regarding the mechanical behavior of the mixtures suggested that mixtures with the addition of 0.5% RR-1C exhibited higher strengths compared to mixtures with the same content of CP II-F 32 cement type and without the incorporation of asphalt emulsion, indicating a relationship between porosity reduction and strength benefits of cemented mixtures, although this relationship is not direct and influenced by other variables. Despite imparting strength to CTCS, a corresponding increase in stiffness in the investigated mixtures was not observed. The results of dynamic modulus and resilience, at 28 days of curing, indicated a reduction in stiffness in mixtures where rapid-breaking emulsion was added.

KEYWORDS: CTCS; asphalt emulsion, porosity, mechanical behavior.

INTRODUÇÃO

O emprego eficiente e racional dos materiais disponíveis tem incentivado estudos sobre a viabilidade da incorporação de estabilizantes químicos para aprimorar o comportamento mecânico das misturas de agregados em camadas de pavimentos.

De acordo com Albuquerque e Mendonça (2017), em regiões com alto volume de tráfego, bases ou sub-bases estabilizadas quimicamente com cimento Portland podem ser adotadas como solução estrutural para pavimentos, visando melhorar seu desempenho e reduzir os custos a longo prazo, desde que o comportamento mecânico seja compreendido e considerado no dimensionamento da estrutura.

A utilização de materiais estabilizados com cimento Portland, como a brita graduada tratada com cimento (BGTC) em camadas de base e sub-base de pavimentos tem sido extensivamente pesquisada como alternativa para melhorar o desempenho estrutural sob a ação do tráfego (PRADO *et al.*, 2020; GU *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2023; MARIK *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2024). Contudo, apesar das vantagens, Balbo (2006) alerta para a heterogeneidade da mistura devido aos baixos teores de cimento, alta porosidade e fissuração da BGTC, originada da retração hidráulica e fadiga.

Diante desse cenário, esta pesquisa buscou responder à seguinte questão: O uso de emulsão asfáltica como aditivo à BGTC pode reduzir sua porosidade, resultando em melhorias no desempenho da mistura?

BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

Segundo definição do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR, 2018), a BGTC corresponde à camada de base ou sub-base composta por mistura, em usina, de produtos de britagem, cimento e água, adequadamente compactada e submetida a processo eficiente de cura.

A brita graduada tratada com cimento tem

suas origens na utilização de cimento para estabilização de solos, com estudos realizados na década de 1910 a 1920 (KLINSKY e FARIA, 2015). De acordo com Bernucci *et al.* (2006), no Brasil, o uso da BGTC começou a ser difundido no final da década de 1970, usada com intuito de conferir maior resistência e menores deformações à estrutura.

Conforme explicam Andrade *et al.* (2015), a água adicionada à BGTC tem a finalidade de auxiliar na compactação e hidratar o cimento que se mistura à fração granular fina. Assim, é formada uma pasta que se liga pontualmente ao agregado graúdo, mas não o envolve totalmente, em decorrência da baixa quantidade de cimento. Essa configuração confere à brita graduada tratada com cimento uma matriz heterogênea, com certa quantidade de poros. Os poros, áreas vazias, tornam-se zonas de fragilidade, que favorecem o surgimento de fissuras e trincas na camada cimentada.

A BGTC, enquanto camada de base, após fissurar, funciona como um conjunto de blocos que fornece incontáveis entalhes para a abertura de fissuras e sua posterior propagação ascensional na camada de revestimento asfáltico, apenas pelo contato (BALBO, 2006). Assim, conferir uma menor porosidade a misturas de brita graduada tratada com cimento poderia significar ganhos em termos de desempenho mecânico e aumento da vida útil do pavimento.

EMULSÃO ASFÁTICA DE RUPTURA RÁPIDA

Com o propósito de melhorar o desempenho da BGTC como camada de pavimentação, a incorporação de aditivos e adições às misturas cimentadas tem se apresentado como alternativa viável. Baghini *et al.* (2015) investigaram o impacto da emulsão asfáltica de ruptura lenta no comportamento mecânico de uma mistura de agregado granítico tratado com cimento. Observou-se que a inclusão de 3% de emulsão betuminosa em misturas contendo 4% de cimento Portland resultou em aumento da resistência à compressão, resistência à tração indireta e módulo de elasticidade em 8,7%, 27,9% e 19,3%, respectivamente. Além disso, houve uma redução

de 179,4% na absorção de água e permeabilidade em comparação com misturas de agregados tratadas com 4% de cimento Portland e sem adição de emulsão.

Dareyni *et al.* (2018) e Dareyni e Moghaddam (2019) examinaram a influência da emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida em misturas de concreto compactado com rolo (CCR) e confirmaram a diminuição dos poros capilares com a adição da emulsão asfáltica nas misturas cimentadas. Entretanto, foi identificada uma redução na resistência à compressão simples e na resistência à tração na flexão com o aumento do teor de emulsão asfáltica.

Diante da hipótese formulada e da revisão da literatura sobre os materiais rodoviários investigados, o presente estudo procurou analisar o comportamento de misturas de brita graduada tratada com cimento com a adição de diferentes teores e tipos de emulsão asfáltica.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir o objetivo desse estudo foi elaborado um plano experimental dividido em três etapas, as quais envolvem dosagem das misturas, ensaios mecânicos e avaliação da porosidade da brita graduada tratada com cimento.

Na primeira etapa foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RTCD), aos 7 dias. Nessa etapa foram avaliadas diferentes misturas de BGTC, com variações no teor de cimento e incorporação de emulsão asfáltica em diferentes dosagens. Desse modo, elaborou-se um planejamento fatorial para nortear as análises quanto à influência das variáveis nos citados parâmetros mecânicos.

Nesse estudo as variáveis analisadas são o teor de cimento, 3,0% e 5,0%; o tipo de emulsão, RR-1C e RL-1C; e teor da emulsão, 0,0% 0,5%, 1,0% e 2,0%. Na Tabela 1 podem ser visualizadas as variáveis analisadas e a codificação dos níveis aplicados.

Tabela 1. Plano experimental (2² x 4)

Fator	Variável	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
		(1)	(2)	(3)	(4)
TC	Teor de cimento	3,0%		5,0%	
E	Tipo de emulsão	RR-1C		RL-1C	
TE	Teor de emulsão	0,0%	0,5%	1,0%	2,0%

O plano experimental desenvolvido possui 16 combinações (2x2x4). Na Tabela 2 são indicados os planejamentos fatoriais para as variáveis de interesse, com todos os tratamentos possíveis e a quantidade de réplicas analisadas em cada ensaio.

Tabela 2. Planejamento fatorial completo

Tratamento	Teor de cimento	Emulsão	Teor de emulsão	Réplicas por ensaio	
				RCS	RTCD
1	1	1	1	2	3
2	1	1	2	2	3
3	1	1	3	2	3
4	1	1	4	2	3
5	4	1	1	2	3
6	4	1	2	2	3
7	4	1	3	2	3
8	4	1	4	2	3
9	1	4	1	2	3
10	1	4	2	2	3
11	1	4	3	2	3
12	1	4	4	2	3
13	4	4	1	2	3
14	4	4	2	2	3
15	4	4	3	2	3
16	4	4	4	2	3

O tratamento 1, por exemplo, corresponde à mistura com 3,0% de cimento CP II-F 32, já o tratamento 2 corresponde à mistura com 3,0% de cimento CP II-F 32 e 0,5% de emulsão RR-1C.

Das combinações apresentadas, observam-se tratamentos em repetições. Os tratamentos 1 e 9 correspondem à mesma mistura, com 3,0% de cimento CP II-F 32 e sem aditivo, bem como os tratamentos 5 e 13 são iguais, com 5,0% de cimento CP II-F 32 e sem aditivo. Portanto, ao descartar os tratamentos em repetições, resta um total de 14 combinações a serem investigadas, por meio de 70 ensaios, sendo 28 ensaios de resistência à compressão simples e 42 ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Com o planejamento fatorial apresentado e os resultados dos ensaios propostos, considerando os tratamentos 1 e 5, 3% de CP-II F e 5% de CPII-F, respectivamente, como misturas de referência em seus respectivos teores de cimento, prosseguiu-se para a segunda e terceira etapas, apenas com os tratamentos que apresentaram influência no aumento dos parâmetros ensaiados.

Na segunda etapa foram analisados os parâme-

tros associados a porosidade, absorção e índice de vazios, além se obtenção de imagens com microscopia eletrônica de varredura (MEV), concluindo a plano experimento com a avaliação dos parâmetros mecânicos, terceira etapa.

Materiais

Nesse estudo foram utilizados agregados de origem gnáissica, areia adquirida no comércio local, cimento Portland tipo CP II-F 32, água, e emulsões asfálticas catiônicas RR-1C e RL-1C.

A caracterização dos agregados foi realizada a partir da granulometria e índice de forma, segundo especificam as normas brasileiras DNER-ME 083/98 e DNIT 425/2020-ME, respectivamente, além da determinação da absorção e massa específica, conforme metodologia indicada na norma brasileira DNER-ME 081/98. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3. Caracterização do agregado graúdo

Agregados	Absorção (%)	Massa específica seca g/cm ³	Índice de forma
Brita 25	0,26	2,697	2,01
Brita 19	0,29	2,700	2,28
Pedrisco	0,55	2,697	

Com a granulometria dos agregados, foi determinada, por tentativa, uma composição dos agregados para a BGTC que se enquadrasse na faixa granulométrica preestabelecida. De acordo com os resultados obtidos por Prado (2018) e dando continuidade aos avanços nos estudos do Grupo de Pesquisa sobre o tema, esse trabalho utilizou a faixa granulométrica apresentada no manual sul-africano, *South African Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014). Assim, foi obtida uma composição granulométrica, antes da adição de cimento Portland, constituída por 11,0% de brita 25; 15,0% de brita 19; 19,0% de pedrisco; 38,5% de pó de pedra; 12,5% de areia; e 4,0% de material de filler.

Nas misturas de BGTC foram utilizados o cimento Portland tipo CP II-F 32 (cimento Portland composto com material carbonático e classe de resistência igual a 32 MPa), em dois teores do ligante hidráulico (3% e 5%). O CP II-F 32 possui em sua composição 75% a 89% de clínquer mais sulfatos de cálcio e 11% a 25% de material carbonático. O CP II-F 32 utilizado nas misturas de BGTC foi caracterizado com base no índice de finura, tempo de pega e resistência à compressão, seguindo especificações das normas brasileiras NBR 11579 (ABNT, 2012), NBR 16607 (2018) e NBR 7215 (ABNT, 2019), respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4. Ensaios de caracterização do cimento Portland.

Tipo de cimento	Índice de finura (%)	Massa específica (g/cm³)	Início de pega
CP II-F 32	2,20	3,151	2h
Resistência à compressão simples (MPa)			
	24 h	7 dias	28 dias
CP II-F 32	10,16	18,46	25,42

Foram utilizadas as emulsões asfálticas RR-1C (emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida) e RL-1C (emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta). As emulsões foram doadas por empresas atuantes no estado de Sergipe.

A água potável usada estava livre de materiais orgânicos, óleos ou outras substâncias prejudiciais à hidratação do cimento.

Dosagem e Mistura

Definida a proporção de cimento e agregados na mistura, realizou-se o ensaio de compactação para determinar a umidade ótima e massa específica aparente seca máxima das misturas de referência: 3% de CP II-F e 5% de CP II-F.

O ensaio de compactação foi executado seguindo os procedimentos descritos na norma brasileira DNIT 164-ME (DNIT, 2013). Na determinação da umidade de compactação foram levadas em consideração a quantidade de água adicionada na mistura, somada à média ponderada da umidade do agregado miúdo e reduzida a média ponderada da absorção do agregado graúdo. Assim, foi obtida a curva de compactação utilizando teores de umidade crescentes com adições de 1,0%, cinco pontos.

Para 3 % de CP II-F 32, obteve-se uma massa específica aparente seca máxima igual a 2,435g/cm³ e umidade ótima de 5,20%. Já o ensaio de compactação para a mistura com 5% de CP II-F 32 resultou em uma massa específica aparente seca máxima e umidade ótima iguais a 2,317 g/cm³ e 5,80%, respectivamente

Com base nos valores obtidos no ensaio de compactação, percebe-se que o incremento do teor

de cimento, de 3% para 5%, promove uma diminuição da massa específica aparente seca máxima e aumento da umidade ótima. Efeito semelhante foi encontrado nos ensaios realizados por Prado (2018), que analisou as propriedades mecânicas de misturas de BGTC. Quando utilizando a mesma faixa granulométrica da presente pesquisa (SAPEM, 2014), percebeu-se que o aumento do teor de cimento nas misturas levou a um aumento da umidade ótima e redução da massa específica aparente seca máxima.

Determinadas as proporções de agregados, cimento e água, as amostras sem aditivos (emulsões asfálticas) foram preparadas e moldadas. Essas misturas correspondem às misturas de referência

Para misturas com emulsão asfáltica foi realizada uma correção na água adicionada à mistura, que diminuiu em decorrência da água presente na emulsão, a fim de garantir a moldagem na umidade ótima do tratamento de referência. Nessas amostras, primeiro eram misturados os agregados e o cimento, depois eram inseridas a água misturada previamente com a emulsão.

As amostras misturadas foram moldadas com mecanismos de compactação e em moldes específicos para cada ensaio. Concluída a moldagem, embalou-se o conjunto (molde e material compactado) em filme de policloreto de vinil (PVC), para conservar a umidade. O conjunto foi levado à câmara úmida, onde permaneceu por um período de 24 horas. Decorrido esse tempo, o corpo de prova foi desmoldado e novamente embalado em filme de PVC. Então, deixou-se a amostra na câmara úmida para conclusão do período de cura de sete ou vinte e oito dias, quando foram realizados os ensaios mecânicos e avaliação da porosidade.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na primeira etapa do plano experimental foram executados os ensaios de RCS e RTCD. Determinou-se a resistência à compressão simples com

base na metodologia da NBR 5739 (ABNT, 2018a) e a moldagem conforme a norma DNIT 181-ME (DNIT, 2018). O ensaio de resistência à tração por compressão diametral seguiu os procedimentos apresentados pela norma DNIT 136-ME (DNIT, 2018). Na Tabela 5 é possível visualizar os resultados obtidos.

Tabela 5. RCS e RTCD de amostras de BGTC aos 7 dias de cura

% Cimento	Aditivo	RCS (MPa)		Média (MPa)	RTCD (MPa)			Média (MPa)
3%	-	4,73	4,73	4,73	0,47	0,42	0,43	0,44
5%	-	7,91	8,52	8,21	1,00	1,06	0,97	1,01
3%	0,5% RR-1C	4,29	4,32	4,30	0,50	0,51	0,44	0,48
3%	1,0% RR-1C	3,45	2,98	3,22	0,31	0,38	0,00	0,34
3%	2,0% RR-1C	3,28	2,80	3,04	0,28	0,24	0,37	0,29
5%	0,5% RR-1C	6,42	6,72	6,57	-	0,87	0,83	0,85
5%	1,0% RR-1C	5,93	5,06	5,49	0,84	0,83	0,71	0,79
5%	2,0% RR-1C	5,65	4,66	5,16	0,64	0,53	0,66	0,61
3%	0,5% RL-1C	3,18	3,36	3,27	0,42	0,29	0,40	0,37
3%	1,0% RL-1C	3,56	3,21	3,38	0,25	0,33	0,27	0,28
3%	2,0% RL-1C	2,50	2,35	2,42	0,25	0,28	0,22	0,25
5%	0,5% RL-1C	5,00	6,71	5,85	0,59	0,73	0,71	0,68
5%	1,0% RL-1C	4,79	4,88	4,83	0,69	0,46	0,58	0,57
5%	2,0% RL-1C	3,65	4,61	4,13	0,48	0,42	0,44	0,45

Os resultados demonstram a influência da emulsão asfáltica na RCS e RTCD das misturas cimentadas, sendo o acréscimo do aditivo responsável pela redução das resistências. Apesar de tal constatação, uma vez que a média dos resultados da RTCD da mistura contendo 3% de CP II-F 32 com 0,5% de RR-1C foi superior à média dos resultados

das misturas com 3% de CP II F 32 e sem aditivo (mistura de referência), optou-se por seguir o planejamento experimental com as misturas contendo 3% de CP II-F 32 e 0,5% de RR-1C, a fim de inferir maiores informações sobre a ação da emulsão asfáltica em misturas de BGTC.

Avaliação da porosidade

Seguindo os procedimentos da NBR 9778 (ABNT, 2005), foi possível determinar a absorção (Abs) e índice de vazios (Iv) dos tratamentos investigados, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Absorção e índice de vazios de BGTC aos 7 e 28 dias

% Cimento	Aditivo	Cura (dias)	Abs (%)	Abs média (%)	Ivs (%)	Iv médio (%)
3%	-	7	5,29	5,20	12,17	12,04
			5,17		11,99	
			5,14		11,97	
		28	5,03	4,92	11,92	11,66
			4,65		11,03	
			5,09		12,05	
3%	0,5% RR-1C	7	4,86	4,85	11,25	11,25
			4,80		11,14	
			4,89		11,36	
		28	4,52	4,50	10,75	10,69
			4,52		10,73	
			4,46		10,59	

Percebe-se que para o mesmo tratamento um maior tempo de cura levou a menores absorções e índice de vazios. Em relação ao uso de emulsão asfáltica de ruptura rápida nas misturas cimentadas, verifica-se que a utilização 0,5% de emulsão asfáltica RR-1C nas misturas com 3% de cimento tipo CP II-F 32 levou a uma redução da absorção e índice de vazios em torno de 6% aos 7 dias de cura e de apro-

ximadamente 8% aos 28 dias de cura. A redução da absorção e índice de vazios resultante do uso de emulsão asfáltica como aditivo pode estar relacionada ao efeito positivo da emulsão na compactação da BGTC, sendo necessária menor energia de compactação para atingir uma mesma massa específica uma mistura sem o uso de emulsão.

Microscopia Eletrônica de Varredura

Foram obtidas imagens de microscopia eletrônica de varredura com aumento de 30 vezes, 100 vezes, 500 vezes e 2.000 vezes de três amostras para cada um dos tratamentos investigados, após 28 dias de cura.

Na Figura 1 são observadas as imagens de um corpo de prova, escolhido de forma aleatória, de

cada tratamento investigado. Os resultados do ensaio de índice de vazios indicam que, aos 28 dias, o tratamento correspondente à mistura composta por 3% de CP II-F 32 apresenta maior índice em relação à mistura com 3% de CP II-F 32 e 0,5% de emulsão asfáltica tipo RR-1C. De forma qualitativa, é possível observar uma certa concordância entre os resultados de índice de vazios e os poros identificados nas imagens com ampliação de 30x (Figura 2).

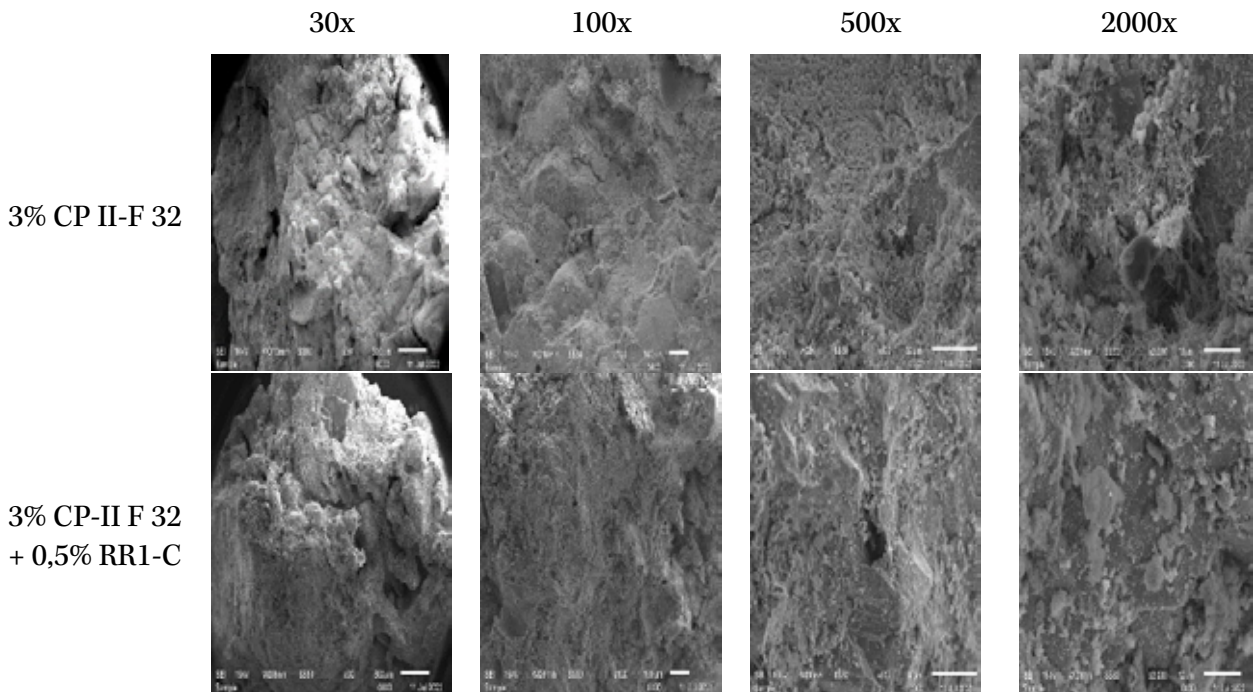


Figura 1. Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura

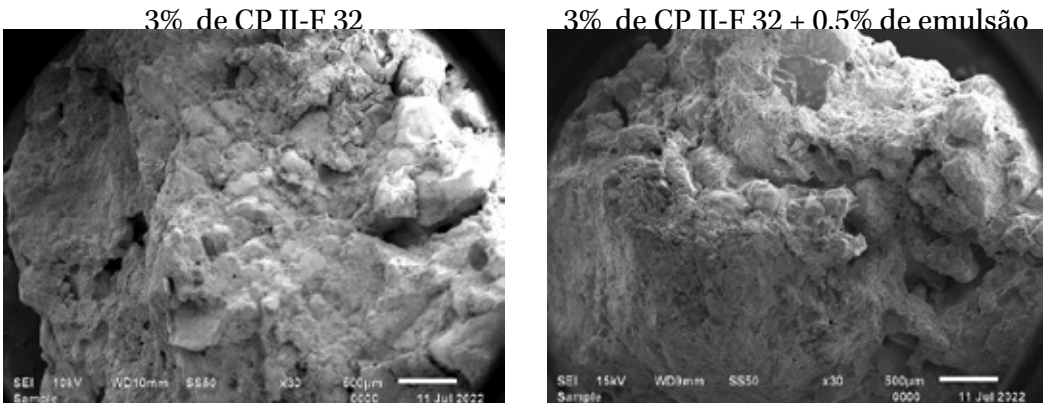


Figura 2. Imagens MEV – 30x

Avaliação Mecânica das Misturas

A resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RTCD) e resistência à tração na flexão (RTF), aos 7 e 28 dias

de cura, para as misturas estudadas são mostradas na Tabela 7. Para determinar a resistência à tração na flexão foram utilizados os métodos de ensaios descritos em C78/78M (ASTM, 2021), AP-R462 (AUSTROADS, 2014), Report 789 (NCHRP, 2014) e NBR 12142 (ABNT, 2010).

Tabela 7. RCS, RTCD e RTF de BGTC aos 7 e 28 dias de cura

Aditivo	Cura (dias)	RCS (MPa)	RCS média (MPa)	RTCD (MPa)	RTCD média (MPa)	RTF (MPa)	RTF média (MPa)
-	7	4,73	4,73	0,47	0,44	0,33	0,33
		4,73		0,42		0,34	
				0,43		0,32	
	28	4,64	4,63	0,69	0,68	0,78	0,77
		4,62		0,65		0,70	
				0,70		0,83	
0,5% RR-1C	7	4,29	4,30	0,50	0,48	0,48	0,42
		4,32		0,51		0,37	
				0,44		0,40	
	28	4,87	5,22	0,81	0,74	0,92	0,86
		5,58		0,70		0,78	
				0,73		0,89	

Constata-se que o tempo de cura é uma variável importante na RCS, RTCD e RTF de misturas de BGTC (como observado nos resultados de RCS e RTCD da primeira etapa). As reações de hidratação do cimento, que conferem rigidez às misturas cimentadas se iniciam após o contato da água com cimento e seguem por dias, a depender da composição do cimento e disponibilidade de água na matriz. Destaca-se o comportamento das misturas com 3% de CP II-F 32 e sem emulsão asfálticas, nas quais é observado um pequeno decréscimo da resistência à compressão simples com o acréscimo do tempo de cura de 7 dias para 28 dias. Apesar de ser um resultado fora do padrão obtido, resultado semelhante foi encontrado por Prado (2018) em misturas de BGTC com 3% de cimento tipo CP II-Z 32 RS, seguindo a granulometria indicada pelo SAPEM (2014) e moldadas na umidade ótima. Na pesquisa em questão, o aumento no tempo de cura, de 7 dias para 28 dias, levou a um decréscimo na RCS média de 4,58MPa para 4,42MPa.

Apesar de haver uma redução de 0,43MPa na RCS da BGTC aos 7 dias de cura nas misturas com emulsão asfáltica, em comparação com a mistura

de referência, constata-se que a utilização da mesma proporção do aditivo confere um aumento de 0,59MPa na RCS aos 28 dias de cura, indicando que para maiores tempos de cura o efeito da utilização de emulsão asfáltica como aditivo à BGTC passa a ser relevante no aumento da RCS.

O efeito da utilização da emulsão asfáltica RR-1C na RTCD é superior aos 28 dias de cura em comparação ao efeito aos 7 dias. Aos 7 dias de cura a utilização de emulsão na mistura de BGTC com 3% de CP II-F 32 conferiu um aumento de 0,04MPa, enquanto aos 28 dias a utilização da mesma proporção da emulsão levou a um acréscimo de 0,06MPa.

Tanto para um tempo de cura de 7 dias quanto para 28 dias de cura, a utilização de emulsão asfáltica como aditivo à BGTC levou a um aumento de 0,09MPa na RTF. O que representa um aumento de 26,26% aos 7 dias e 12,12% aos 28 dias de cura.

Fazendo-se uma análise conjunta entre os resultados de RCS, RTCD e RTF e parâmetros de porosidade, percebe-se que as das misturas com 3% de cimento tipo CP II-F 32 com 0,5% de emulsão apresentarem os menores valores de absorção e ín-

dice de vazios e maiores resistências, em comparação com as misturas com cimento 3% de cimento tipo CII-F 32, sem uso de aditivo. Entretanto, apesar de haver alguma relação entre a porosidade de propriedades mecânicas da BGTC, essa relação não é direta e é influenciada por outros fatores, como demonstra a redução da RCS e redução dos parâmetros associados à porosidade das misturas com 3% de cimento CP II-F32 com o aumento do tempo de cura.

Segundo Bernucci *et al.* (2006), em estruturas de pavimentos é esperado alta resistência à tração, pois a maior resistência na ruptura, de modo geral, é também associada a uma maior resistência à fadiga. Por outro lado, espera-se também que as misturas apresentem baixa rigidez, a fim de evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro. Assim, foram analisados os parâmetros associados à rigidez das misturas cimentadas: mó-

dulos dinâmicos, longitudinal (E^*_{long}), transversal (E^*_{transv}) e torcional (E^*_{tor}), e o módulo de resiliência (MR), com base nos procedimentos estabelecidos na norma americana C215 (ASTM, 2019) e DNIT 181 (2018), respectivamente. A Tabela 8 e Tabela 9 apresentam os resultados obtidos.

O módulo de resiliência das misturas constituídas com CP II-F 32 foi obtido aos 28 dias de cura. Com o gráfico tensão x MR dos pares obtidos no ensaio de carregamento uniaxial dinâmico, verificou-se um crescimento do módulo de resiliência com o aumento da tensão vertical. Desse modo, como forma de comparação entre os tratamentos estudados, adotou-se o módulo de resiliência referente à tensão vertical de 200kPa, tensão na qual as camadas de BGTC (em seu ponto central) normalmente estão sujeitas em campo quando posicionadas como base, não sendo levado como regra (PRADO, 2018)

Tabela 8. Módulos de dinâmicos de BGTC aos 7 e 28 dias

% RR-1C	Cura (dias)	E* long (GPa)	E* long média (GPa)	E* transv (GPa)	E* transv média (GPa)	E* tor (GPa)	E* tor média (GPa)
-	7	17,39	19,42	15,63	17,93	6,36	6,36
		21,44		20,22		6,36	
	28	25,19	25,73	25,64	25,71	8,53	8,96
		26,27		25,78		9,38	
0,5	7	20,38	20,36	19,16	18,97	7,32	7,15
		20,33		18,77		6,99	
	28	23,22	24,17	21,81	23,16	7,80	8,41
		25,12		24,51		9,02	

Tabela 9. Módulo de resiliência de BGTC para tensão desvio de 200 kPa

Tipo de cimento	% de cimento	Cura (dias)	(%) RR-1C	MR (MPa)
CP II-F 32	3	28	-	7.529,22
CP II-F 32	3	28	0,5	5.187,38

As misturas de BGTC com o mesmo tipo e teor de cimento, mas com maior tempo de cura possuem maiores valores de módulos dinâmicos. Sobre a utilização de emulsão asfáltica como aditivo às misturas de BGTC, verifica-se que aos 7 dias de cura ocorre um aumento discreto dos módulos di-

nâmicos, porém aos 28 dias há uma redução dos mesmos módulos.

Em se tratando do módulo de resiliência, verifica-se que a utilização de 0,50% de emulsão asfáltica RR-1C como aditivo à BGTC promove uma pequena redução do MR.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios dos parâmetros associados à porosidade indicaram que o aumento do tempo de cura e a utilização de emulsão asfáltica como aditivo, no teor utilizado, resultam em misturas de BGTC com menor absorção e índice de vazios. A influência do tempo de cura na redução da absorção e índice de vazios está associada as reações de hidratação do cimento, sinalizando um processo de hidratação de cimento ainda ativo.

No que diz respeito ao uso da emulsão asfáltica na redução da absorção e índice de vazios, uma hipótese possível seria o efeito positivo da emulsão na compactação da BGTC, que exigiria uma menor energia de compactação para atingir a mesma massa específica que uma mistura sem o uso de emulsão, culminado em ganhos em termos de tempo de execução e, por consequência, economia. Seriam necessários ensaios de compactação com diversos teores da emulsão para comprovação do efeito positivo da compactação na porosidade da BGTC.

A análise das imagens da microestrutura das misturas de BGTC indicou que as misturas com maiores resistências e menor índice de vazios e absorção apresentam uma matriz mais compacta, com menores cavidades, em relação às misturas com maiores absorção e índice de vazios. Essas imagens consolidam os resultados dos ensaios de laboratório.

Com os ensaios complementares, para determinação de parâmetros de resistência e rigidez, foi possível observar a relação entre a porosidade da BGTC e propriedades mecânicas. O tempo de cura também aparece como uma variável relevante nas propriedades mecânicas das misturas investigadas, obtendo-se valores superiores de resistência e rigidez para maiores tempos de cura. Vale ressaltar que o incremento de resistência para maiores tempos de cura diminui ao longo do tempo, à medida que as reações de hidratação do cimento vão cessando.

Embora constatou-se que existe uma relação entre a redução da porosidade e benefícios em termos de desempenho mecânico, percebe-se que essa relação não é direta e sofre a influência de outras variáveis, como o tempo de cura, por exemplo.

Sobre o módulo de resiliência das misturas ci-

mentadas, os resultados obtidos aos 28 dias de cura com as misturas compostas por CP II-F 32 apontaram que a utilização de emulsão asfáltica como aditivo à BGTC leva a uma redução desse módulo aos 28 dias. Desse modo, o uso de emulsão asfáltica como aditivo à BGTC propicia uma mistura com um discreto aumento da resistência à compressão e à tração aos 28 dias e uma redução do MR, o que pode ser positivo em termo de desempenho do material.

Salienta-se que apesar dos resultados indicarem benefícios com o uso de emulsão asfáltica como aditivo às misturas cimentadas, seu uso prático deve levar em consideração uma análise particular do benefício-custo desses insumos, levando em consideração os aspectos mais relevantes na execução do projeto, sejam eles de ordem técnica ou econômica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.

ALBUQUERQUE, F. S.; DE MENDONÇA, A. T. Análise crítica e ajuste de modelos de previsão de fadiga com análise incremental de danos para BGTC executada em pavimento asfáltico semirrígido. *Transportes*, [S.l.], v. 25, n. 2, p. 101–117, 2017. DOI: 10.14295/transportes.v25i2.1046. ISSN: 2237-1346.

ANDRADE, L. R. *et al.* Comportamento mecânico de camadas de base granular e tratada com cimento em rodovias de tráfego muito pesado. In: Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, 29., 2015, Ouro Preto. Anais [...]. Ouro Preto, 2015. p.148-159.

ASTM. American Society for Testing and Materials. C78/C78M. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). Estados Unidos, 2021.

_____. C215. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. Estados Unidos, 2020.

AUSTROADS. AP-R462: Cemented Materials Characterization. Sydney, 2014.

BAGHINI, M. S.; ISMAIL, A. B.; KARIM, M. R. B.; SHOKRI, F.; FIROOZI, A. A. Effects on engineering properties of cement-treated road base with slow setting bitumen emulsion. *International Journal of Pavement Engineering*, 2015. DOI: 10.1080/10298436.2015.1065988.

BALBO, J. T. Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura. *Transportes*, [S.l.], v. 14, n. 1, 2006. DOI: 10.14295/transportes.v14i1.59.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Petrobras: ABEDA. Rio de Janeiro: 2006. 504 p.

DAREYNI, M.; MOGHADDAM, A. M. Fresh and mechanical properties of roller compacted concrete containing cationic asphalt emulsion admixture. *Construction and Building Materials* 198 (2019) 226–236.

DAREYNI, M.; MOGHADDAM, A. M.; DELARAMI, A. Effect of cationic asphalt emulsion as an admixture on transport properties of roller-compacted concrete. *Construction and Building Materials* 163 (2018) 724–733.

DER/SP. Departamento de Estradas e Rodagem do Estado do Paraná. ES-P 16/18: Pavimentação: brita graduada tratada com cimento. Paraná, 2018.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre. DNIT 164-ME: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. DNIT 136-ME: Pavimentação asfáltica – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018a.

_____. DNIT 181/2018-ME: Pavimentação – Material estabilizado quimicamente - determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018b.

GU, J., LYU, H., YANG, J., ZENG, C. Effects of cement content and curing period on geotechnical properties of cement-treated calcareous sands. *Transportation Geotechnics*, Volume 33,

2022, Article 100732, ISSN 2214-3912, <<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100732>>.

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V. C. Estudo da influência do teor de cimento Portland, da energia de compactação e da umidade no comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados. 2015. Relatório elaborado para a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) – Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR), Concessionária CCR Nova Dutra, Grupo CCR, 2015.

MARIK, S. et al. Laboratory study and performance evaluation of cement treated base using chemical stabiliser. *Road Materials and Pavement Design*, v. 24, n. 6, p. 1522–1541, 2023. <<https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2083660>>.

NCHRP. National Cooperative Highway Research Program. Report 789. Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis. Washington, 2014.

PRADO, K. Estudo de Critérios de dosagem para melhoria de desempenho mecânico de brita graduada tratada com cimento. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

PRADO, K.; ALBUQUERQUE, F. S.; ALMEIDA, G. B. de O. Influence of granulometry, cement content, and moisture in the mechanical performance of the cemented crushed stone. *Transportes*, [S.l.], v. 28, n. 1, p. 81–98, 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i1.1861.

SAPEM. South African Pavement Engineering Manual. South African National Roads Agency Soc Ltd. 2. ed. 2014.

WANG, Y. et al. Effects of ambient temperature and compaction delay time on the performance of cement-stabilised sand-gravel and the determination of allowable construction delay time. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 25, n. 1, 2024. <<https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2345798>>.

ZHANG, X.; YAN, K.; LIU, W. Partially replacing cement with rice husk ash (RHA) in cement stabilised macadam (CSM) containing reclaimed asphalt pavement (RAP) for qualified base materials. *Road Materials and Pavement Design*, v. 24, n. 10, p. 2483–2503, 2023. <<https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2150275>>.

O QUE A ABPv OFERECE AOS ASSOCIADOS



Entidade técnico-cultural sem fins lucrativos fundada em 1959 no Rio de Janeiro, a ABPv tem por missão promover a preservação, a manutenção, o aprimoramento cultural e o desenvolvimento da técnica de pavimentação no Brasil.

- Divulgação da cultura e técnica da pavimentação através do ensino (treinamentos e cursos), publicações periódicas, seminários, eventos e palestras.
- Promoção da melhoria do ensino da pavimentação.
- Promoção de ações, estudos, convênios técnicos-científicos e projetos para solução de problemas que dificultem o aperfeiçoamento das técnicas de pavimentação.
- Intercâmbio de conhecimentos entre técnicos e entidades nacionais e estrangeiras no que se relaciona às normas, pesquisas, projetos, convênios e literatura especializada.
- Apoio às organizações congêneres que tenham os mesmos objetivos que a ABPv.
- Realização de eventos periódicos para divulgação e discussão de trabalhos técnicos-científicos, workshops e minicursos.
- Estimulo à participação do seus sócios nos trabalhos de pavimentação.
- Preservação do registro da memória da pavimentação do País.
- Realização de eventos periódicos para a divulgação e discussão de trabalhos técnicos-científicos.

Entre as atividades educacionais e atividades culturais da ABPv destacam-se, além dos cursos de capacitação profissional, dois grandes eventos de nível nacional: a RAPv – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO; e a RPU – REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA. Realiza também a EXPOPAVIMENTAÇÃO, uma exposição de produtos e serviços da área de engenharia de pavimentação.