



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

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

*Clara Rayssa Romero Rodrigues Souza<sup>1</sup>; Bruno Cavalcante Mota<sup>2</sup>; Marcos Lamha Rocha<sup>3</sup>;  
Francisco Thiago Sacramento Aragão<sup>4</sup> & Luis Alberto Herrmann do Nascimento<sup>5</sup>*

#### RESUMO

Considerando a grande utilização de recursos naturais no setor de transportes, a necessidade de desenvolver tecnologias sustentáveis tem se tornado cada vez mais urgente. Alguns fatores devem ser levados em consideração na escolha dessas tecnologias, incluindo o clima, a estrutura, o tráfego, entre outros pontos que vão influenciar a durabilidade e o conforto proporcionado pelo pavimento. Este trabalho avalia o desempenho mecânico, no que diz respeito à deformação permanente, de cinco tipos de misturas asfálticas: convencional quente, morna, morna com o uso de material fresado, com e sem agente rejuvenescedor, e quente com material fresado e agente rejuvenescedor. O programa FlexPave 1.1 foi utilizado para simular o desempenho mecânico dessas misturas em uma estrutura de pavimento flexível e para diferentes condições climáticas e de tráfego. Os resultados obtidos demonstraram a influência das condições climáticas na durabilidade e no desempenho dos pavimentos asfálticos, de acordo com o tipo de mistura adotada. Os resultados também evidenciaram a importância da consideração de aspectos ambientais em conjunto com a seleção adequada de materiais e o método de produção de misturas asfálticas para a geração de pavimentos resistentes e duradouros.

**PALAVRAS-CHAVE:** Mistura Asfáltica Morna, Reclaimed Asphalt Pavement, Deformação Permanente, Sustentabilidade.

#### ABSTRACT

Considering the large use of natural resources in the transportation sector, the need to develop sustainable technologies has become increasingly urgent. Some factors must be taken into consideration when choosing these technologies, including the climate, structure, traffic, among other points that will influence the durability and comfort provided by the pavement. This work evaluates the mechanical performance, with regard to permanent deformation, of five types of asphalt mixtures: conventional hot, warm, warm with the use of milled material, with and without rejuvenating agent, and hot with milled material and rejuvenating agent. The FlexPave 1.1 program was used to simulate the mechanical performance of these mixtures in a flexible pavement structure and for different climatic and traffic conditions. The results obtained demonstrated the influence of climatic conditions on the durability and performance of asphalt pavements, depending on the type of mixture adopted. The results also highlighted the importance of considering environmental aspects together with the appropriate selection of materials and the method of producing asphalt mixtures to generate resistant and long-lasting pavements.

**KEY WORDS:** Warm Asphalt Mixture, Reclaimed Asphalt Pavement, Permanent Deformation, Sustainability

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, clararayssasouza@gmail.com; bruno.mota@coc.ufrj.br; marcoslr94@gmail.com; fthiago@coc.ufrj.br

<sup>5</sup>CENPES / Petrobras, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, luisnascimento@petrobras.com.br



## INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a Pesquisa CNT de Rodovias tem demonstrado que as condições das estradas pavimentadas no Brasil ainda requerem considerável melhoria em termos de desempenho. Este fato é corroborado pelo ranking de competitividade global do Fórum Econômico Mundial, onde o Brasil foi classificado em 93º lugar entre 141 países no que diz respeito à qualidade das rodovias. Este ranking avalia índices de conectividade e as condições operacionais das vias, colocando o Brasil em posição inferior a outros países da América Latina (CNT, 2021).

As atividades relacionadas à construção e à reabilitação do sistema viário consomem consideráveis quantidades de energia e recursos naturais, gerando resíduos e emitindo gases do efeito estufa. A busca por práticas ambientalmente conscientes está diretamente ligada à adoção de materiais sustentáveis e requer avanços tecnológicos para melhorar o desempenho sem comprometer a qualidade da pavimentação. Além disso, certos processos operacionais, como a usinagem e a compactação de misturas, demandam altas temperaturas, variando entre 140°C e 180°C.

Diante disso, a necessidade de promover no setor de pavimentação a adoção de novos processos e tecnologias capazes de reduzir os impactos ambientais e alinhados à busca pela eficiência energética e redução das emissões de poluentes impulsionou o surgimento das misturas asfálticas mornas, também conhecidas como *Warm Mix Asphalt* (WMA). As WMAs oferecem benefícios ambientais significativos, como a redução de 18% a 30% no consumo de energia, devido às temperaturas mais baixas de produção e compactação em comparação com as misturas convencionais a quente [Hamzah *et al.*, 2010; Rodríguez-Alloza *et al.*, 2015; Almeida-Costa e Benta, 2016].

Seguindo esse movimento de conscientização ambiental, o setor de pavimentação tem se voltado também para a produção de misturas asfálticas utilizando pavimento reciclado, conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Estudos sobre a viabilidade técnica do RAP em misturas asfálticas confirmam que o desempenho geralmente é comparável ao das misturas convencionais e, em alguns casos, pode até ser superior (Freire *et al.*, 2014). No entanto, a quantidade média de RAP incorporada nas misturas asfálticas permanece limitada a teores mais baixos. Nos EUA, a média anual de uso de RAP fresado aumentou de 15,6% para 21,1% entre 2009 e 2019 (Brett, 2020).

Apesar dos inúmeros benefícios, essas tecnologias sustentáveis ainda são subutilizadas na indústria brasileira de asfaltos, e uma das razões para isso é a incerteza em relação aos efeitos a longo prazo. Nesse contexto, este estudo avalia o desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil no que diz respeito à deformação permanente atrelada ao problema de afundamento de trilha de roda, por meio de simulações estruturais utilizando a ferramenta FlexPave 1.1. As análises consideram os efeitos de variáveis relevantes, como clima, intensidade do tráfego e tipo de mistura asfáltica, no desempenho da estrutura do pavimento. Espera-se que pesquisas como esta incentivem o uso de materiais sustentáveis em projetos de pavimentação, proporcionando ganhos ambientais sem comprometer o desempenho das estruturas.

## METODOLOGIA

### Produção das Misturas Asfálticas

Foram utilizados os seguintes materiais na composição das misturas: ligante, aditivo surfactante para a produção das misturas mornas, Agente Rejuvenecedor (AR), agregados de origem pétreo e RAP. Após a seleção dos materiais, foi realizada a caracterização física dos agregados e do RAP para a determinação de suas propriedades. Em seguida, os ligantes puro, modificado com agente surfactante e recuperado do RAP também foram caracterizados.

As misturas foram dosadas considerando a metodologia Superpave, de acordo com a Norma AASHTO M323 (2017) e ensaiadas para a avaliação do seu comportamento mecânico. Adicionalmente, foram realizadas simulações estruturais no FlexPave 1.1 para avaliar os efeitos das características dos materiais nas respostas da estrutura de um pavimento.



O ligante adotado na composição das misturas asfálticas foi um CAP 50/70 (Resolução ANP 897, 2022), classificado como PG 64S-22. O aditivo utilizado para a produção das misturas mornas é de base surfactante, possibilitando a diminuição das temperaturas de usinagem e compactação, sem interferir nas propriedades reológicas do ligante. O teor de incorporação ao ligante adotado foi de 0,35%, conforme indicação da própria fornecedora. Para as misturas mornas, foi recomendado pela fornecedora do aditivo surfactante que as temperaturas de usinagem e compactação fossem diminuídas em 30°C com relação às temperaturas das misturas quentes, como indicado na Tabela 1. Mais informações de caracterização do ligante asfáltico podem ser encontradas em Souza (2023).

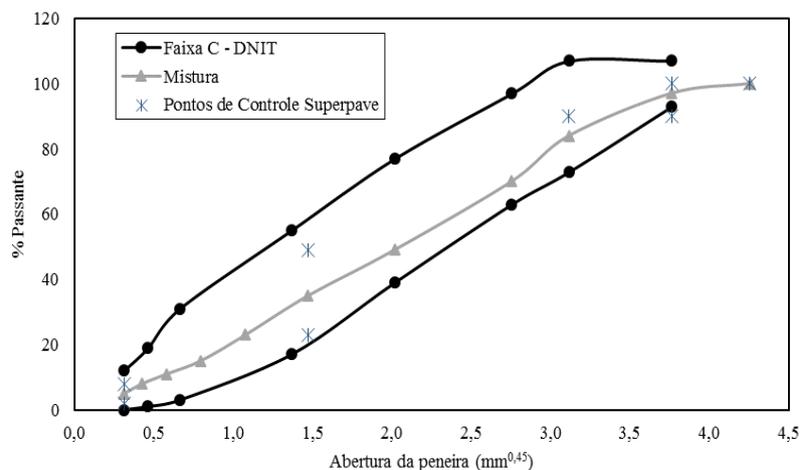
Tabela 1. Faixas de temperatura de usinagem e compactação - CAP 50/70

Mistura	Temperaturas		
	Usinagem	Agregados	Compactação
Quente	147°C a 150°C	157°C a 160°C	135°C a 140°C
Morna	117°C a 120°C	127°C a 130°C	105°C a 110°C

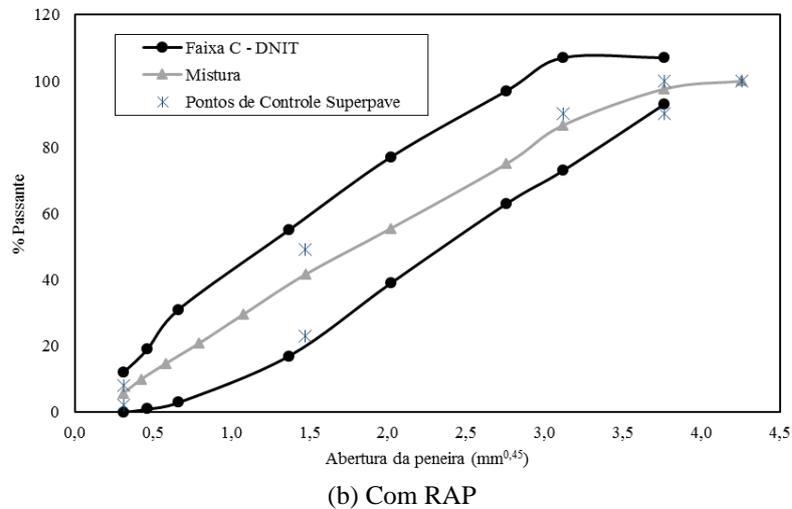
A dosagem do teor do AR usado em algumas misturas com RAP foi realizada considerando características do ligante recuperado. A recuperação do material foi feita usando um equipamento Rotarex, seguindo o Método Abson (ASTM D1856).

O AR utilizado nessa pesquisa foi o AnovaTM 1815, fornecido pela empresa Cargill. Trata-se de um óleo de base vegetal modificado que objetiva melhorar a durabilidade e a resistência ao trincamento das misturas asfálticas, além de proporcionar uma boa compatibilidade com o asfalto, principalmente no que diz respeito ao material envelhecido ou oxidado. Com relação à dosagem do AR, a ficha de informações do produto indica que geralmente os teores de dosagem do AnovaTM 1815 variam de 0,25% a 6,0% com relação à massa do ligante, dependendo do teor de RAP e das características do ligante virgem e do recuperado. Nesta pesquisa, a dosagem do agente rejuvenescedor foi realizada pela própria empresa fornecedora do material a partir da técnica de *blending charts*, chegando a um teor de 1,8%. Na composição das misturas, também foi usado um agregado do tipo gnaíse.

As curvas granulométricas das misturas com e sem RAP são apresentadas nas Figuras 1a e 1b.



(a) Sem RAP



(b) Com RAP  
Figura 1. Curvas de distribuição granulométrica das misturas: a) sem e b) com RAP

O RAP utilizado nesta pesquisa foi disponibilizado pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro. Contudo, não foi possível obter informações do pavimento de origem do qual o material foi fresado. Para as misturas com fresado, 20% da massa retida foi substituída pelo RAP.

A seleção granulométrica considerou a metodologia Bailey. Para isso, como mostra a Tabela 2, foram definidos os parâmetros de análise da Norma DNIT 438 (2022), que consistem na Proporção de Agregados Graúdos (AG), na Proporção Graúda dos Agregados Finos (GAF) e na Proporção Fina dos Agregados Finos (FAF).

Tabela 2. Parâmetros da metodologia Bailey

TMN (mm)	Proporção	Valor	Limite Inferior	Limite Superior
19	AG	0,700	0,6	1,0
	GAF	0,469	0,35	0,5
	FAF	0,478	0,35	0,5

No total, foram avaliadas as cinco misturas asfálticas identificadas na Tabela 3.

Tabela 3. Características das misturas asfálticas avaliadas nesta pesquisa

Mistura	Característica			
	Temperatura	Ligante	% de RAP	Presença do AR
M1	Quente	CAP 50/70	0	Ausente
M2	Morna	CAP 50/70	0	Ausente
M3	Morna	CAP 50/70	20	Ausente
M4	Morna	CAP 50/70	20	Presente
M5	Quente	CAP 50/70	20	Presente



A metodologia de dosagem Superpave foi utilizada para as misturas desta pesquisa considerando um nível de tráfego de médio a alto e um Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,0 mm. Foram realizadas duas dosagens, uma para as misturas sem a incorporação de RAP e outra para as misturas com RAP.

### ***Stress Sweep Rutting (SSR)***

Os corpos de provas moldados para a realização deste ensaio tiveram dimensões de 15 cm de altura por 10 cm de diâmetro e volume de vazios de 7,0% +/- 0,5%. O ensaio foi realizado de acordo com a Norma AASHTO TP 134 (2018). Também foi considerado o protocolo proposto por KIM et al. (2017). O ensaio foi conduzido em duas temperaturas, uma alta (TA) de 54°C e outra baixa (TB) de 20°C, sob pressão de confinamento constante de 69 KPa (10 psi), com três blocos de carregamento de 200 ciclos, cada um para um nível diferente de tensão desvio.

Pelo menos duas réplicas foram ensaiadas para cada temperatura e a diferença relativa da deformação plástica ao final do ensaio entre as réplicas foi inferior a 25%. A deformação axial permanente que ocorre em cada ciclo de carga foi medida usando o deslocamento do atuador. A Figura 2 apresenta um corpo de prova montado para a realização do ensaio SSR.



Figura 2. Corpo de prova para o ensaio de SSR

### **Simulações no FlexPave 1.1**

Foram realizadas 75 simulações para prever o nível de Afundamento de Trilha de Roda (ATR) de uma estrutura fixa de pavimento, representada pela Figura 3, variando-se os parâmetros da mistura asfáltica da camada de revestimento, o tráfego e o clima.

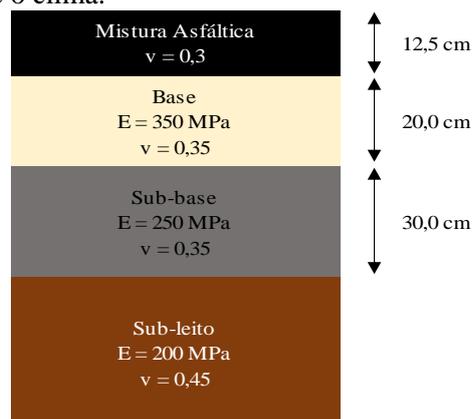


Figura 3. Estrutura de pavimento considerada para as simulações

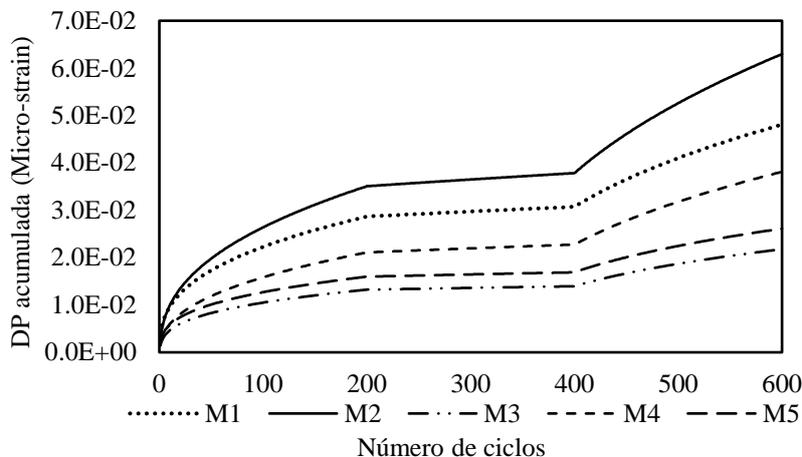


Para o tráfego, foram simuladas três situações: (i) leve com  $N$  de  $3 \times 10^5$ ; (ii) médio com  $N$  de  $3 \times 10^6$  e (iii) muito pesado com um  $N$  de  $3 \times 10^8$  (Prefeitura de São Paulo, 2004). Com relação ao clima, dadas as dimensões continentais do Brasil, foi escolhida uma capital representativa de cada região, a saber: (i) Manaus na Região Norte; (ii) Natal na Região Nordeste; (iii) Goiás na Região Centro-Oeste; (iv) Rio de Janeiro na Região Sudeste e (v) Porto Alegre na Região Sul. As temperaturas destas cidades foram consideradas de acordo com o painel climático do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

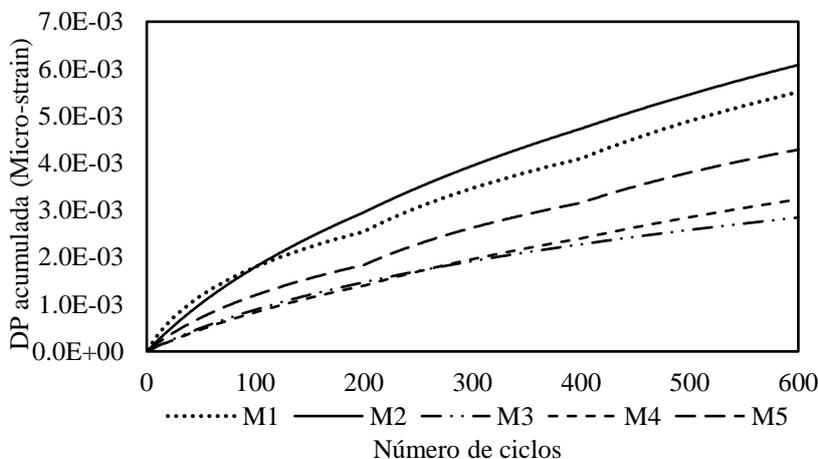
Já para obter o perfil de temperatura do pavimento, utilizou-se o EICM do FlexPave. Os dados climáticos para cada região do país foram obtidos no LTPP InfoPave na seção MERRA *climate data for MEPDG inputs* da FHWA.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios triaxiais SSR realizados para as cinco misturas analisadas são apresentados na Figura 4 (a) para a temperatura alta de  $54^\circ\text{C}$  e na Figura 4 (b) para a temperatura baixa de  $20^\circ\text{C}$ .



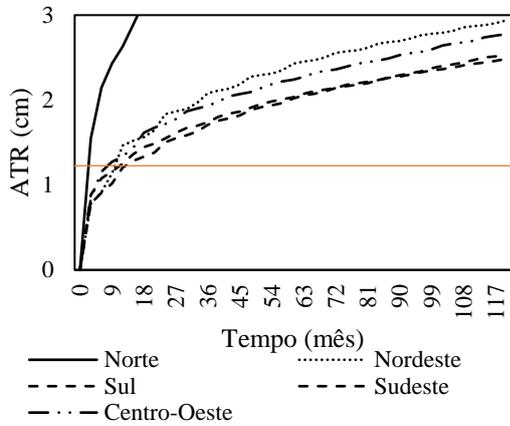
(a) Temperatura alta ( $54^\circ\text{C}$ )



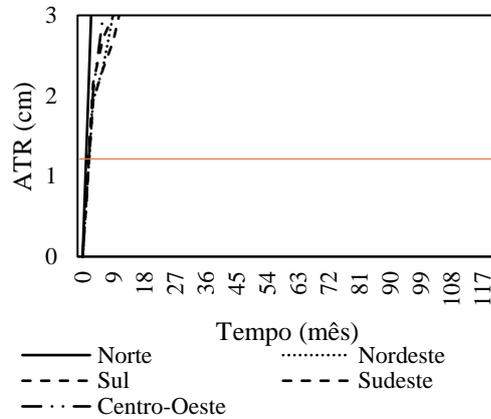


(b) Temperatura baixa (20°C)

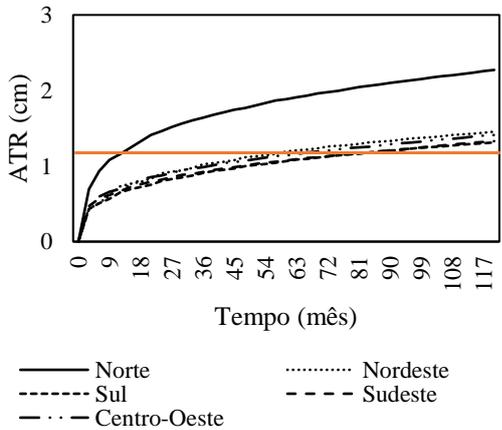
Figura 1: Resultados do SSR



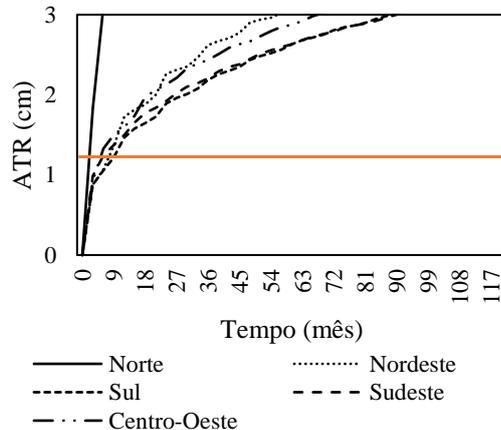
(a) M1



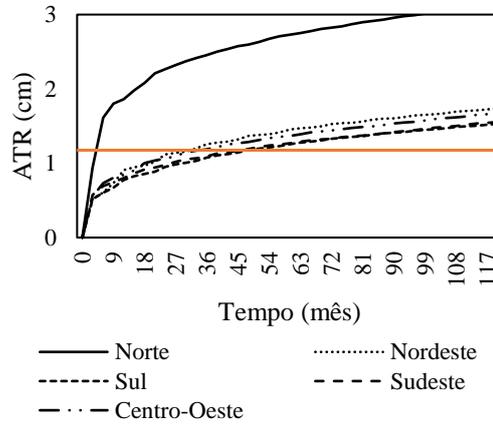
(b) M2



(c) M3

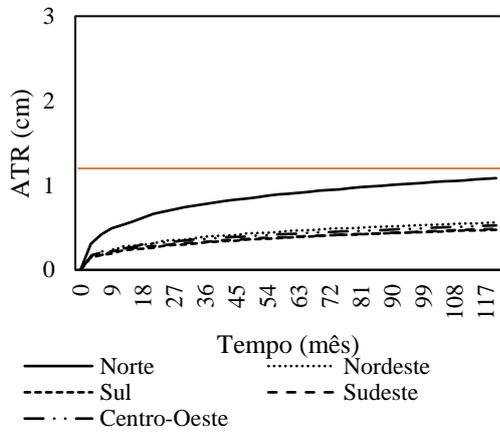


(d) M4

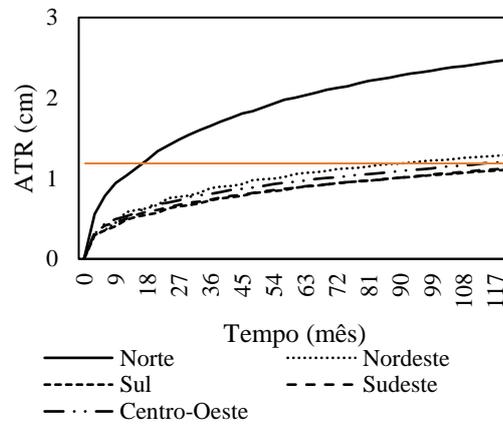


(e) M5

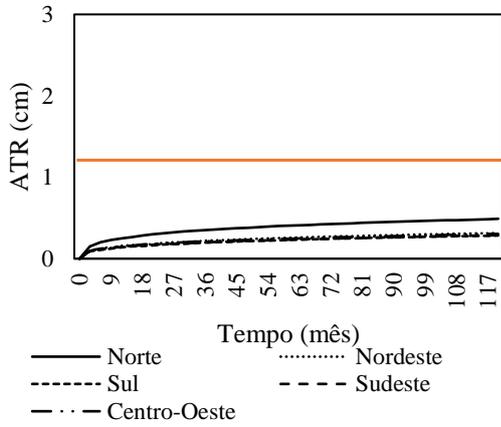
Figura 5. ATR para o tráfego pesado



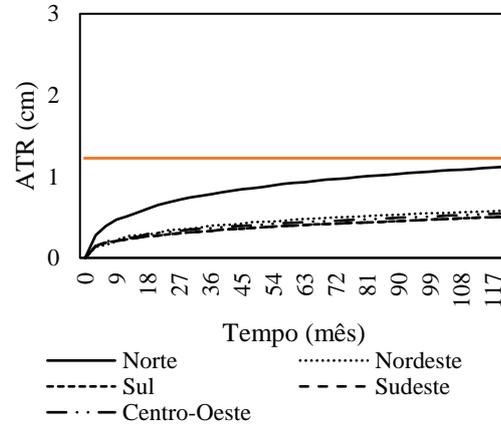
(a) M1



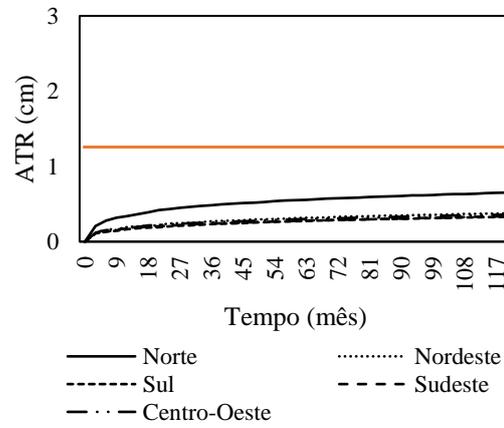
(b) M2



(c) M3

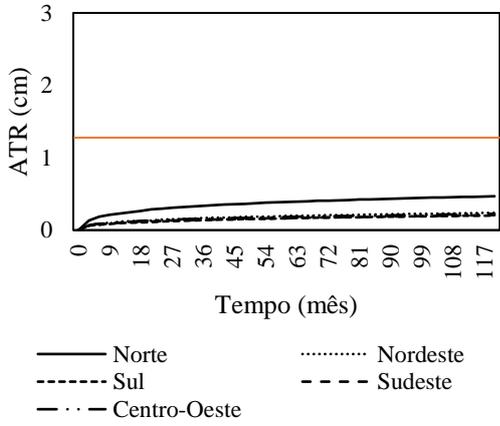


(d) M4

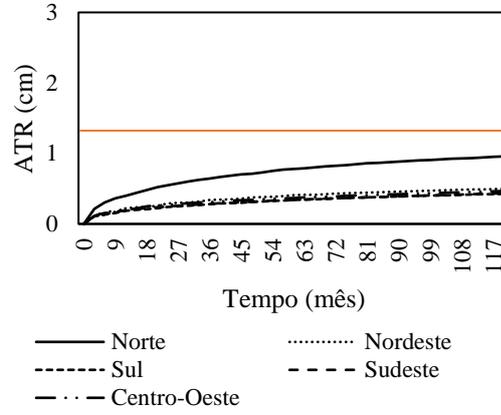


(e) M5

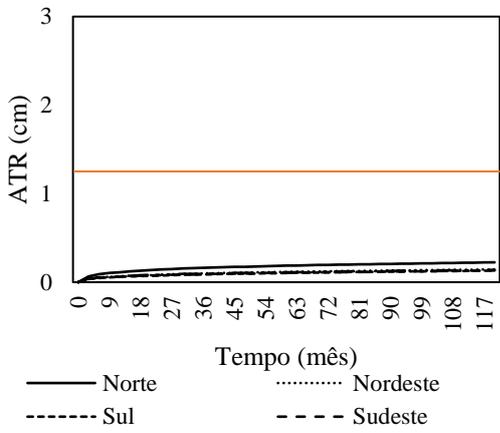
Figura 6. ATR para o tráfego médio



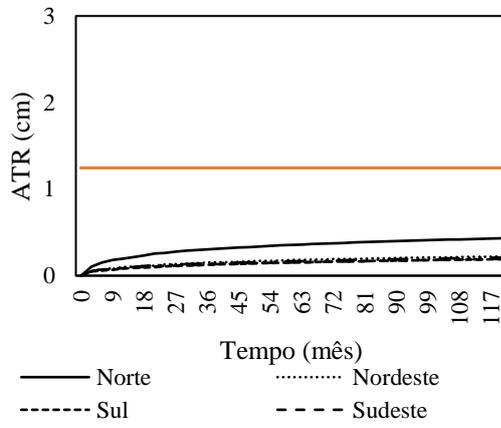
(a) M1



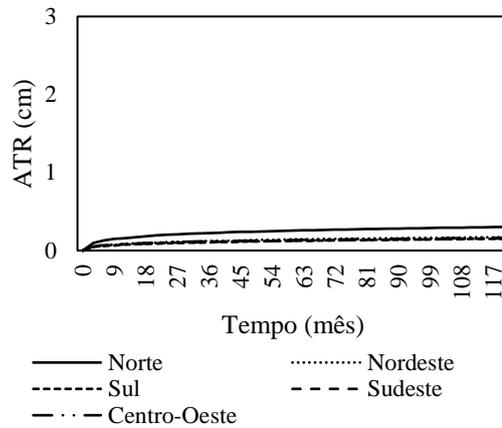
(b) M2



(c) M3



(d) M4



(e) M5

Figura 7. ATR para o tráfego leve

Considerando o clima, percebe-se que os menores valores de ATR foram obtidos para as regiões Sul e Sudeste. Isso ocorre em razão de temperaturas mais amenas em algumas partes do ano. No sentido oposto, a Região Norte, representada pela cidade de Manaus, foi a que apresentou o maior valor de ATR, devido às suas altas temperaturas.

Quando se analisa o tráfego, apenas para o menor N as condições de limite de ATR foram atendidas, resultando em valores menores que 1,25 cm. Para o tráfego elevado, nos meses iniciais, a Mistura 2 (morna) já apresentaria afundamentos próximos da espessura total da camada de revestimento. Essa mistura foi a que apresentou o pior comportamento em todas as situações analisadas.

Para o tráfego médio, apenas as Misturas M2 (morna) e M4 (morna com RAP e com AR) não atenderam ao critério de ATR máximo de 1,25 cm. Essa situação ocorreu apenas para a Região Norte, que possui temperaturas mais elevadas. Essas temperaturas mais elevadas tendem a deixar as misturas mais susceptíveis ao acúmulo de deformação permanente, especialmente por terem sido compactadas em menores temperaturas (misturas mornas).

Considerando o revestimento, as Misturas M2 (morna) e M4 (morna com RAP e com AR) apresentaram maior susceptibilidade ao dano causado pela deformação permanente, já que os ligantes foram expostos a menores temperaturas de usinagem e compactação, implicando em um menor envelhecimento e enrijecimento. Vale salientar que a análise feita considerando as temperaturas de usinagem e de compactação é diferente da análise feita a respeito da influência do clima região estudada. O uso do RAP minimizou o ATR, como é possível observar para as Misturas M3 (morna com RAP) e M5 (quente com RAP e AR), ao proporcionar maior rigidez. Por sua vez, o uso do AR resultou em maior sensibilidade a este tipo de defeito, como observado para a Mistura M4 (morna com RAP e com AR), tendo em vista que sua função é a de otimizar parâmetros relacionados ao trincamento, o que é proporcionado pela redução da rigidez conferida pelo uso do RAP.

Ao analisar o uso do RAP atrelado ao efeito da temperatura, percebe-se que por conferir maior rigidez à mistura, o uso do fresado implicou em uma menor deformação permanente, principalmente para a Mistura M3, que é morna e sem o agente rejuvenescedor.

## CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil no que diz respeito à deformação permanente atrelada ao problema de afundamento de trilha de roda, por meio de simulações estruturais utilizando a Ferramenta FlexPave 1.1. As análises consideraram os efeitos de variáveis relevantes, como clima, intensidade do tráfego e tipo de mistura asfáltica, no desempenho da estrutura do pavimento.



Os resultados indicaram a forte influência do clima na durabilidade das misturas asfálticas, com as Regiões Sul e Sudeste apresentando menores valores de ATR devido às suas temperaturas mais amenas. A Região Norte, representada no estudo pela cidade de Manaus, apresentou o pior desempenho, como consequência de altas temperaturas. Além disso, em condições de tráfego intenso, ocorreram afundamentos próximos à espessura total da camada de revestimento, especialmente em misturas compactadas em temperaturas mornas sem RAP.

A análise da sensibilidade da mistura à temperatura de usinagem e compactação e ao tipo de revestimento destacou que as Misturas M2 (morna sem RAP) e M4 (morna com RAP e AR) foram mais susceptíveis ao dano causado pela deformação permanente devido à exposição dos ligantes a menores temperaturas de usinagem e compactação, resultando em um menor envelhecimento e enrijecimento. O uso de RAP minimizou o ATR, conferindo maior rigidez. Isso evidencia a importância da seleção adequada dos materiais e técnicas de construção para garantir a durabilidade do pavimento.

O benefício do uso do RAP associado ao efeito da temperatura ressaltou que a utilização de RAP conferiu maior rigidez às misturas, resultando em menor deformação permanente, especialmente para a mistura compactada em temperatura morna e sem o agente rejuvenescedor. Isso sugere que o uso de material fresado e a reciclagem de materiais asfálticos podem contribuir significativamente para a sustentabilidade do pavimento, reduzindo a necessidade de novos materiais e minimizando o impacto ambiental associado à produção de asfalto convencional.

Por fim, os resultados evidenciam uma grande oportunidade para a adoção de técnicas de dosagem balanceada, que induzem à seleção otimizada dos materiais para gerar misturas com desempenho mecânico superior.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do CENPES/PETROBRAS.

## REFERÊNCIAS

- AASHTO M 323: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, 30th Ed., AASHTO, Washington, DC. 2017.
- ALMEIDA-COSTA, A., BENTA, A. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*. 112, 2308e2317. 2016.
- ANP. Resolução ANP nº 897. 2022. Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-897-de-18-de-novembro-de-2022-445759308>>.
- ASTM D1856 – 09. Recovery of Asphalt from solution by Abson method. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2015.
- BRETT, A. W.; WILLIIS, J. R.; SHACAT, J. Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2019. 10th Annual Survey Final Report. National Asphalt Pavement Association, 2020.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2021. Brasília: CNT, SEST, SENAT, 2021. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER). Glossário de Termos da Qualidade. Rio de Janeiro, RJ, 1997.
- DNIT 438/2022 - ME. Pavimentação - Misturas Asfálticas - Seleção Granulométrica de agregados para concreto asfáltico pelo Método Bailey - Procedimento. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2022. DNIT 416/2019 - ME. Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do módulo dinâmico - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2019.



HAMZAH, M.O., JAMSHIDI, A., SHAHADAN, Z. Evaluation of the potential of Sasobit® to reduce required heat energy and CO2 emission in the asphalt industry. *Journal of Cleaner Production*. 18, 1859e1865. 2010.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. IP – 02/2004 CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS, 2004.

RODRÍGUEZ-ALLOZA, A.M., MALIK, A., LENZEN, M., GALLEGO, J. Hybrid input-output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures. *J. Clean. Prod.* 90, 171e182, 2015.

FREIRE, J.; GÓIS, T.S.; DOMINICINI, W.K.; LUTIF, J. O estado da arte sobre uso de reciclado de pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo. XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Curitiba, nov., 2014.

SOUZA, C. R. R. R. Análise do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas Quentes e Mornas Produzidas com Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Usando a Abordagem de Dano Contínuo Viscoelástico. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.