

Desempenho de pavimentos asfálticos: comparação entre previsões MeDiNa, ensaios HVS e dados de tráfego real

Asphalt pavement performance: Comparing MeDiNa predictions with HVS testing and real-traffic data

Maurício Silveira dos Santos^{✉,1}, Luciano Pivoto Specht², Deividi da Silva Pereira³, Lucas Dotto Bueno⁴, Márcio Muniz de Farias⁵, Luiz Guilherme Rodrigues de Mello⁶, Lorenzo Chaves Pacheco⁷, e Paula Taiane Pascoal⁸

¹Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil, mauriciosilveira@unipampa.edu.br, 0000-0002-6120-1872

²Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, luspecht@ufsm.br, 0000-0002-8709-6273

³Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, dsp@ufsm.br, 0000-0002-7200-7813

⁴Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, lucas.bueno@ufsm.br, 0000-0001-8171-4192

⁵Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, muniz@unb.br, 0000-0002-5257-911X

⁶Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, Distrito Federal, Brasil, luiz.mello@dnit.gov.br, 0000-0002-1507-0154

⁷Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, lorenzo.chaves@acad.ufsm.br, 0009-0001-7948-6343

⁸Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, ptpascoal@hotmail.com, 0000-0003-0565-9667

Recebido: 15 de janeiro de 2025

Revisado: 17 de outubro de 2025

Aceito: 27 de janeiro de 2026

Publicado: 11 de março de 2026

Editor Associado:

Kamilla Vasconcelos

Universidade de São Paulo, Brasil

Palavras-chave:

Segmento experimental.

Simulador de grande porte.

Fadiga.

Keywords:

Experimental segment.

Heavy vehicle simulator.

Fatigue.

DOI: 10.58922/transportes.v34.e3090



RESUMO

A previsão do desempenho de pavimentos asfálticos é uma tarefa complexa da Engenharia de Pavimentos, exigindo ensaios laboratoriais e bancos de dados de trechos experimentais capazes de captar a parcela empírica do comportamento estrutural. Assim, esta pesquisa avaliou três segmentos experimentais implantados na BR-116, no Rio Grande do Sul, denominados A, B e C, distintos pelo tipo de ligante asfáltico (CAP 50/70, AMP 55/75 e AMP 60/85) e pela espessura do revestimento (5 cm nos segmentos A e B e 14 cm no segmento C). Os segmentos foram solicitados pelo tráfego real e por um simulador do tipo *Heavy Vehicle Simulator* (HVS). Também foram realizados ensaios laboratoriais para determinação de parâmetros de rigidez e dano, permitindo a aplicação do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). A evolução da fadiga em campo foi comparada às curvas obtidas a partir da porcentagem de área trincada simulada no MeDiNa. O Segmento B apresentou melhor compatibilidade entre as metodologias. Nos segmentos A e C observaram-se divergências entre os resultados do HVS, tráfego real e MeDiNa. Assim, não houve compatibilidade global entre as abordagens, indicando a necessidade de aprimoramento do protocolo de utilização do simulador, possivelmente associada às condições climáticas locais e à natureza da solicitação.

ABSTRACT

Predicting the performance of asphalt pavements is a complex task in Pavement Engineering, requiring both laboratory tests and databases of experimental sections to capture the empirical components of structural behavior. This research evaluated three experimental segments implemented on the BR-116 highway in Rio Grande do Sul, designated A, B, and C. These segments differed in their asphalt binder types (CAP 50/70, AMP 55/75, and AMP 60/85) and asphalt layer thicknesses (5 cm for segments A and B, and 14 cm for segment C). The segments were subjected to both real traffic and a Heavy Vehicle Simulator (HVS). Additionally, laboratory tests were conducted to determine stiffness and damage parameters, enabling the application of the National Design Method (MeDiNa). The evolution of field fatigue was compared to the cracked area percentage curves simulated in MeDiNa. Segment B demonstrated the highest compatibility across methodologies. However, in segments A and C, discrepancies were observed between the HVS, real traffic, and MeDiNa results. Consequently, there was no overall compatibility among the approaches, indicating a need to refine the methodological protocol for simulator use, potentially accounting for local climatic conditions and the nature of the loading.

1. Introdução

A previsão de desempenho de pavimentos asfálticos frente ao fenômeno de fadiga é uma tarefa desafiadora. Para isso, é preciso conhecer os materiais utilizados na construção das camadas, e realizar um projeto adequado para as necessidades específicas do local onde será construído o pavimento.

Há algumas formas empíricas de prever o desempenho por meio de ensaios diretamente no campo, com a implantação de trechos experimentais ou seções testes nos próprios locais onde será construído o pavimento. Segundo [Fritzen \(2005\)](#), a utilização de trechos experimentais faz com que problemas de escala de experimentos realizados em laboratório, que modifica fatores existentes no campo relacionados as condições ambientais, são minimizados com a avaliação *in loco*. Além disso, o autor menciona que a determinação de curvas de desempenho, que levam em consideração o clima e o tráfego do local é a maior vantagem no estudo sistemático em trechos reais.

[Mattos \(2014\)](#) menciona ainda que é necessário um monitoramento constante das condições funcionais e da capacidade estrutural dos pavimentos, para assim realizar a calibração de modelos de trincamento por fadiga, juntamente com ensaios de laboratório considerando as características dos materiais utilizados na construção da via, do clima e do tráfego atuante na estrutura.

No entanto, a determinação de fatores campo-laboratório pode ser morosa, devido à necessidade da observação sistemática de resultados de trechos ao longo do tempo. Logo, [du Plessis et al. \(2017\)](#) e [Waka Kotahi \(2022\)](#) citam que para reduzir o tempo de acompanhamento do trecho até sua degradação, pode-se trabalhar com simuladores de tráfego de médio ou grande porte.

Pesquisas mais recentes utilizaram o HVS principalmente para realizar a avaliação da deformação dos pavimentos. Os trabalhos [Lee, Le & Kim \(2023\)](#) e [Tong et al. \(2023\)](#) são exemplos de estudos que utilizaram o HVS para avaliar a deformação permanente em misturas com pavimento asfáltico reciclado (RAP). Ainda, a pesquisa de [Rust et al. \(2022\)](#) avaliou a deformação em bases e sub-bases estabilizadas com emulsão modificada. Já com relação a avaliação da área trincada, os trabalhos de [Fritzen \(2005\)](#), [Wu, Harvey & Signore \(2012\)](#) e [Bańkowski, Gajewski & Sybilski \(2013\)](#) mostram a necessidade da realização de novos estudos com uso de HVS para avaliação de trincamento de revestimentos asfálticos com o uso do HVS.

Além disso, o uso de simuladores de tráfego com controle da magnitude das cargas e número de solicitações permite a aplicação de resultados em outras condições de tráfego, o que não acontece de forma totalmente satisfatória em trechos estudados apenas com o tráfego normal da via, uma vez que é muito difícil definir de forma precisa a magnitude das solicitações ([Hugo & Martin, 2004](#); [Victorino, 2008](#); [Medina & Motta, 2015](#)).

Além do monitoramento de campo, é necessário ainda a avaliação em laboratório dos materiais utilizados na construção dos trechos. [Motta \(1991\)](#) e [Bueno \(2016\)](#) explicam que o dimensionamento do pavimento pelo processo mecanicista, estimado pelos cálculos de tensões, deformações e deslocamentos atuantes na estrutura, é pertinente apenas se forem conhecidas as propriedades dos materiais utilizados na construção. Assim, uma das formas de se dimensionar o pavimento é por meio do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). [Franco & Motta \(2020\)](#) citam que a abordagem de dimensionamento da estrutura pelo MeDiNa é mecanístico-empírico, e que a caracterização da mistura asfáltica com relação à fadiga é feita por meio do ensaio de tração por compressão diametral, seguindo a norma DNIT-ME 183 ([DNIT, 2018c](#)).

Logo, o objetivo desta pesquisa é verificar a viabilidade de utilização de simulador de grande porte em trechos experimentais, relacionando a frequência de trincamento do revestimento asfáltico de três segmentos experimentais, com o comportamento a fadiga das três misturas asfálticas ensaiadas em laboratório e previstas pelo sistema de dimensionamento MeDiNa. Para isso, foram construídos três segmentos com misturas asfálticas com diferentes tipos de ligantes asfálticos. As estruturas foram monitoradas durante a solicitação do simulador de tráfego do tipo *Heavy Vehicle Simulator* (HVS) – Simulador de Grande Porte, e durante a solicitação do tráfego real da via.

2. Materiais e métodos

Foram definidos três segmentos experimentais para serem monitorados na BR-116, distantes aproximadamente 84 km de Porto Alegre, capital do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). Os segmentos consistem em uma obra de implantação de pavimento novo, em caráter de duplicação da via existente. Foi escolhido um segmento com características idênticas às aquelas definidas no projeto da via e outros dois

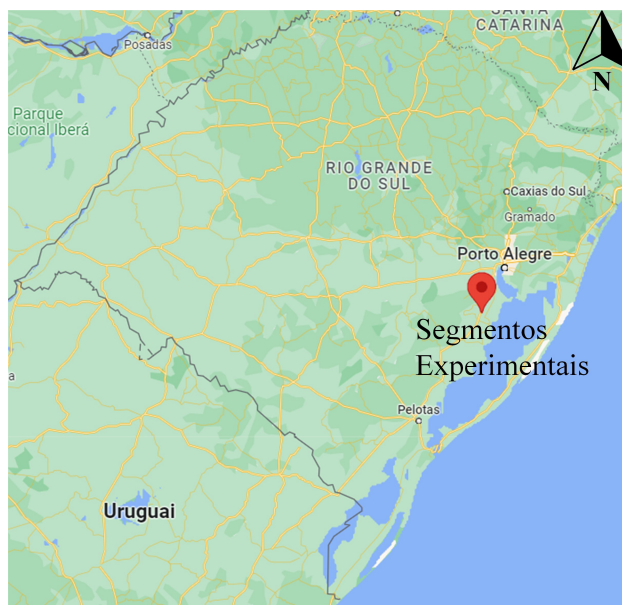


Figura 1 • Localização dos segmentos experimentais avaliados (adaptado de Google Maps).

km 350+840	km 350+640	km 350+120	km 349+820	km 348+380	km 348+000
Segmento A		Segmento B		Segmento C	
				Revestimento (AMP 60/85)	4 cm
				Revestimento (AMP 55/75)	5 cm
				Revestimento (AMP 55/75)	5 cm
Revestimento (CAP 50/70)	Revestimento (AMP 60/85)	Revestimento (AMP 60/85)	Revestimento (AMP 60/85)	Base (Brita Graduada Simples)	15 cm
Base (Brita Graduada Simples)	Base (Brita Graduada Simples)	Base (Brita Graduada Simples)	Base (Brita Graduada Simples)	Sub-base (Macadame seco)	18 cm
Sub-base (Macadame seco)	Sub-base (Macadame seco)	Sub-base (Macadame seco)	Sub-base (Macadame seco)	Subleito	
Subleito	Subleito	Subleito	Subleito		
200m		300m		380m	

Figura 2 • Perfis transversais dos segmentos experimentais avaliados.

segmentos onde ocorreu alteração da espessura de revestimento e tipo de ligante asfáltico empregado na camada de rolamento.

O primeiro segmento recebeu a denominação de Segmento A, localizado entre o km 350+840 e o km 350+640, totalizando 200 metros de extensão; o segundo recebeu a denominação de Segmento B, estando distribuído entre o km 350+120 e o km 349+820, perfazendo 300 metros de comprimento; o último segmento, com 380 metros de comprimento, foi denominado Segmento C, entre o km 348+380 e o km 348+000.

O tráfego estabelecido no projeto de pavimentação da rodovia foi contabilizado para um período de projeto de 10 anos, totalizando $N = 8,1 \times 10^7$ (método USACE). Conforme mencionado previamente foram mantidas as características do projeto original no Segmento C, apresentado na Figura 2. Já nos Segmentos A e B as camadas de base, sub-base e mantiveram as espessuras e materiais de suporte, alterando-se apenas a espessura da camada de revestimento e o tipo de ligante asfáltico a ser empregado. Objetivou-se, com esta ação, obter resultados de fadiga das misturas elaboradas com diferentes tipos de ligantes asfálticos de forma acelerada.

No que tange a opção pelos ligantes expostos na Figura 2, foram escolhidos o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 por ser um ligante usualmente utilizado nas misturas da região de estudo. Já os Asfaltos Modificados por Polímeros (AMP) 60/85 e 55/75 estão sendo utilizados no projeto/implantação da duplicação da rodovia onde os trechos foram estabelecidos. Ainda em relação à composição estrutural

Tabela 1 • Caracterização dos materiais de subleito e base dos segmentos experimentais [adaptado de Ben et al. (2024) e Sagrilo (2024)]

Camada de Subleito		
Ensaio	Norma	Resultado
Grupo MCT	DNIT - CLA 259 (DNIT, 2023a)	LG'
MCT - Coeficiente c'	DNIT - CLA 259 (DNIT, 2023a)	1,61
MCT - Índice e'	DNIT - CLA 259 (DNIT, 2023a)	0,64
Massa específica (g/cm ³)	ABNT NBR 6458 (ABNT, 2016)	1,825
Camada de Base		
Ensaio	Norma	Resultado
Faixa Granulométrica	DNIT - ES 141 (DNIT, 2022)	Faixa A
Massa específica (g/cm ³)	DNIT- ME 164 (DNIT, 2013)	2,123
Umidade ótima (%)	DNIT - ME 443 (DNIT, 2023b)	5,6
Abrasão Los Angeles (%)	DNER-ME 035 (DNER, 1998a)	20,72
Índice de suporte Califórnia (%)	DNIT-ME 172 (DNIT, 2016)	176,59
Umidade ótima (%)	DNIT - ME 443 (DNIT, 2023b)	16,0
Módulo de Resiliência – Modelo Composto Pezo et al. (1992)		
	Subleito	Base
Coeficiente de Regressão (k_1)	658,47	2.557,76
Coeficiente de Regressão (k_2)	0,207	0,800
Coeficiente de Regressão (k_3)	-0,051	0,071
Coeficiente de Regressão (k_4)	0,0	0,0
R ²	0,71	0,96
Deformação Permanente – Guimarães (2009)		
	Subleito	Base
Coeficiente de Regressão (k_1)	0,285	0,051
Coeficiente de Regressão (k_2)	6,433	-0,729
Coeficiente de Regressão (k_3)	-0,160	1,391
Coeficiente de Regressão (k_4)	0,041	0,160
R ²	0,98	0,95

dos segmentos experimentais, as características do material utilizado na camada de subleito e da camada de base em Brita Graduada Simples (BGS) estão apresentadas na Tabela 1.

Para a camada de sub-base, foi utilizado macadame seco, com granulometria do material graúdo enquadrado entre 2 e 4 polegadas e material de enchimento composto por 55% de pedrisco e 45% de pó de pedra, sendo todo o material proveniente da jazida localizada nas instalações de britagem do 1º Batalhão Ferroviário Guaíba.

O revestimento asfáltico do Segmento A foi executado com 5 cm de espessura, sendo empregado o Cimento Asfáltico de Petróleo do tipo CAP 50/70. Para o revestimento asfáltico do Segmento B, foi utilizado o Asfalto Modificado por Polímero - AMP 60/85, também com espessura de 5 cm. Já o Segmento C, o qual as características originais definidas em projeto foram mantidas, recebeu duas camadas de *binder* com 5 cm de espessura cada uma, executadas com o ligante AMP 55/75, e mais uma camada com 4 cm de mistura asfáltica executada com o ligante AMP 60/85. As misturas asfálticas foram dosadas pelo método Marshall, com características dos materiais apresentadas na Tabela 2.

Verifica-se na Tabela 2, que a única mistura que apresentou teor de ligante fora do limite de $\pm 0,3\%$ foi a mistura feita com CAP 50/70, em que a mistura de campo teve teor abaixo do estipulado em projeto, fato que pode ter dificultado a compactação do material. No entanto, verificou-se que o grau de compactação e o volume de vazios de campo ficou dentro do esperado, não trazendo efeito na compactação da mistura. Além disso, as três misturas tiveram grau de compactação e volume de vazios dentro dos parâmetros de aceitação. É importante ressaltar também que a supervisão de obra, durante as fases de controle, não identificou problemas no teor de ligante. Reforça-se que os segmentos experimentais compreendem uma pequena porção da obra geral, não permitindo que as interpretações referentes às inconsistências

Tabela 2 • Caracterização dos materiais das misturas asfálticas

Ensaio	Norma	CAP 50/70	AMP 60/85	AMP 55/75
Faixa granulométrica	DNIT-ES 031 (DNIT, 2024)	C	C	B
Densidade do Ligante (g/cm ³)	DNER-ME 193 (DNER, 1996)	1,015	1,02	1,012
Equivalente de Areia da Mistura (%)	DNER-ME 054 (DNER, 1997)	61,19	61,19	61,19
Índice de Forma – Brita 1 (3/4")	DNER-ME 086 (DNER, 1994c)	0,95	0,95	0,95
Índice de Forma – Brita 0 (3/8")	DNER-ME 086 (DNER, 1994c)	0,77	0,77	0,77
Abrasão Los Angeles (%)	DNER-ME 035 (DNER, 1998a)	36,0	36,0	36,0
Durabilidade (%)	DNER-ME 089 (DNER, 1994d)	1,21	1,21	1,21
Absorção (%)	DNER-ME 081 (DNER, 1998b)	0,8	0,8	0,8
Densidade Mistura Mineral (g/cm ³)	DNER-ME 081 (DNER, 1998b)	2,635	2,635	2,635
Teor de ligante de projeto (%)	DNER-ME 053 (DNER, 1994a)	4,9	4,7	4,3
Teor de ligante do campo (%)	DNER-ME 053 (DNER, 1994a)	4,4	4,5	4,4
Volume de vazios de projeto (%)	DNER-ME 043 (DNER, 1995)	4,0	4,0	4,0
Volume de vazios de campo (%)	DNER-ME 043 (DNER, 1995)	5,01	4,88	6,37
Grau de compactação (%)	DNIT-ES 031 (DNIT, 2024)	99,99	98,48	99,5
Densidade Máxima Medida (g/cm ³)	DNIT-ME 427 (DNIT, 2020)	2,479	2,481	2,481
Relação Betume Vazios (%)	DNER-ME 043 (DNER, 1995)	76,85	76,00	70,44
Resistência à Tração (MPa)	DNIT-ME 136 (DNIT, 2018b)	2,38	2,5	2,28
Estabilidade Marshall (kgf)	DNER-ME 043 (DNER, 1995)	1138	2033	1643
Fluência (mm)	DNER-ME 043 (DNER, 1995)	3,73	3,00	3,07
Adesividade (CBB DOP) (%)	DNER-ME 078 (DNER, 1994b)	0,1	—	—

construtivas sejam transferidas para o restante da rodovia.

Com as misturas asfálticas empregadas em campo, coletadas diretamente da vibroacabadora, conforme protocolo exposto em Vestena *et al.* (2024), foram realizados no laboratório de pavimentação do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV), os ensaios de Módulo de Resiliência (MR) (DNIT-ME 135/2018) (DNIT, 2018a) e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) (DNIT, 2018b). Além disso, foi realizada também a caracterização quanto ao comportamento à fadiga, mediante ensaio de Fadiga à Tração por Compressão Diametral (DNIT-ME 183/2018). Para a realização dos ensaios foi utilizada a prensa *Universal Testing Machine* (UTM-25), que possui câmara de condicionamento climatizada, atuador hidráulico com célula de carga e *Linear Variable Differential Transformers* (LVDTs).

No ensaio de fadiga, o critério de escolha para falha da amostra (N_f) foi a ruptura total do CP. Logo, os LVDTs permaneceram na amostra até o ciclo de número 60, sendo posteriormente retirados para evitar danos no equipamento no momento da ruptura da mostra. Para determinar a deformação inicial (ε_i), foi utilizada a média dos valores das deformações obtidas entre os ciclos 25 ao 30, 40 ao 45 e 55 ao 60, sendo o valor de ε_i , juntamente com o N_f , utilizado para determinação dos coeficientes K_1 e K_2 , que são dados de entrada no MeDiNa.

A solicitação do pavimento em campo foi realizada tanto pelo simulador de tráfego HVS quanto pelo tráfego real da vida, sendo possível determinar o trincamento em campo por essas duas formas de solicitação. O HVS foi utilizado para acelerar a degradação do pavimento. O HVS aplicou carga por meio de um pistão hidráulico acoplado a um semieixo de rodas duplas, funcionando por 22 horas diárias. Durante esse período eram realizadas cerca de 547 passagens por hora. As duas horas restantes do dia eram dedicadas a ensaios de avaliação do pavimento e manutenção do equipamento. O semieixo se deslocava longitudinalmente à via cerca de 10 m, sendo desconsiderado 1,5 m nas extremidades devido à aceleração e desaceleração do semieixo, restando assim 7,0 m para a avaliação. Além do deslocamento longitudinal, o semieixo também se movia transversalmente ao eixo da via, cobrindo aproximadamente 79 cm de largura da pista.

O simulador foi posicionado inicialmente na faixa externa do Segmento A, como pode ser verificado na Figura 3a, na estaca 350+770, dando início as suas operações no dia 24 de março de 2022, permanecendo no local até o dia 16 de maio de 2022. Posteriormente o HVS foi deslocado para o Segmento B (Figura 3b), sendo instalado na estaca 350+020, onde teve a solicitação ao pavimento realizada entre os dias 19 de maio de 2022 e 03 de junho de 2022. Após a solicitação no Segmento B, o HVS foi transferido



Figura 3 • Simulador de tráfego HVS nos Segmentos (a) Segmento A, (b) Segmento B e (c) Segmento C.

Tabela 3 • Níveis de carregamento no Segmento A e N_{USACE} para cada carregamento

Período de carregamento	Número de ciclos do semieixo com cada carregamento	Carga do semieixo (tf)	N_{USACE} para cada carregamento
24/03/2022 à 07/04/2022	138.038	6,0	1,42E+06
07/04/2022 à 09/04/2022	24.725	6,5	4,20E+05
09/04/2022 à 18/04/2022	104.334	7,0	2,81E+06
18/04/2022 à 16/05/2022	327.703	7,5	1,36E+07

para a estaca 348+200, localizada no Segmento C (Figura 3c); neste local, o HVS aplicou carga no pavimento do dia 07 de junho de 2022 até o dia 30 de junho de 2022.

Para avaliar o revestimento asfáltico em relação ao trincamento por fadiga, decidiu-se que as lâmpadas de simulação de aquecimento solar não seriam ligadas. Essa medida visou evitar que eventuais danos por acúmulo de deformações permanentes em trilha de rodas (ATR) levassem à ruína o pavimento antes de sua falência por fadiga, foco das simulações aceleradas. Ademais, para prevenir o rompimento do pavimento devido ao ATR, optou-se por iniciar os testes no Segmento A com a carga de 6,0 tf no semieixo, sendo que esta carga é menor do que a carga geralmente estabelecida pela empresa responsável pela operação do equipamento, permitindo um aumento gradual no carregamento durante a coleta de dados, como é mostrado na Tabela 3. Essa estratégia foi adotada em função das altas temperaturas registradas no estado do Rio Grande do Sul, sendo constatada temperaturas no pavimento, dentro do simulador, de 31 °C, que coincidiram com o início das atividades do HVS. Assim, são expostos na Tabela 3, os números de ciclos aplicados no Segmento A para cada nível de carregamento.

Assim, no Segmento A, foram realizadas 594.800 passagens do semieixo, totalizando um $N_{USACE} = 1,83 \times 10^7$. Já os Segmentos B e C iniciaram com a carga do semieixo em 7,5 tf, com o intuito de acelerar o processo de trincamento do revestimento. Assim, no Segmento B, foram totalizadas 174.020 passagens acumuladas do semieixo, que representa um $N_{USACE} = 7,23 \times 10^6$. No Segmento C, foram contabilizadas 275.027 passagens acumuladas do semieixo, sendo esse valor equivalente ao $N_{USACE} = 1,17 \times 10^7$.

Como não há uma norma específica para a avaliação de trincamento do pavimento com o simulador de tráfego HVS, foi adotada a metodologia utilizada nos estudos de Gonçalves (2002) e Azambuja (2004). Essa abordagem emprega uma grelha quadrada de 1 metro por 1 metro, subdividida em células de

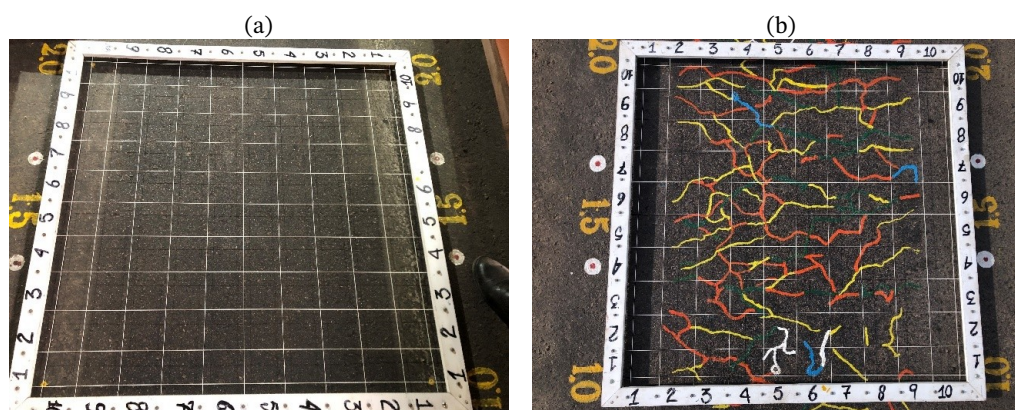


Figura 4 • Avaliação de frequência de trincamento com uso do HVS (a) grelha de análise e (b) grelha com indicação das fissuras

10 cm por 10 cm, conforme ilustrado na Figura 4a. Por se tratar de uma metodologia que analisa o surgimento de defeitos em células dentro da grelha, entende-se que ela é similar ao método de avaliação de pavimentos proposto pela norma DNIT-PRO 433 (DNIT, 2021). Assim, a frequência do surgimento de trincas é determinada com base no número de células avaliadas, definindo-se assim a frequência de trincamento. Além disso, a visualização do trincamento durante o ensaio foi facilitada com a demarcação das fissuras que surgiam no revestimento, conforme é possível observar na Figura 4b. Esta avaliação foi realizada uma vez por dia, com exceção dos dias chuvosos em que não era possível verificar as trincas no pavimento.

Considerando que a aplicação de carga do simulador HVS se restringia à 79 cm da largura da pista de teste, não foram observadas fissuras nas células situadas nos 10 centímetros à direita e nos 10 centímetros à esquerda da grelha quadrada de 1 metro por 1 metro. Portanto, essas células nas extremidades foram desconsideradas no cálculo da frequência de trincamento.

A avaliação do trincamento por fadiga com a solicitação do tráfego real ocorreu a partir do dia 28 de outubro de 2022, data da abertura da via ao tráfego. Deve-se reforçar que o monitoramento dos segmentos experimentais ao longo da ação do tráfego real não ocorreu apenas na região onde ficou posicionado o simulador de tráfego, mas sim em toda a extensão dos segmentos experimentais. Para contabilização da frequência de trincamento da via, foram seguidas as recomendações da norma DNIT-PRO 433 (DNIT, 2021) para a avaliação de defeitos na superfície do pavimento.

Os dados de tráfego foram obtidos por um contador automático presente no km 351+950, operado pelo DNIT. O valor do Fator de Distribuição foi contabilizado em 0,939 para a faixa externa (mais carregada) e 0,061 para faixa interna (menos carregada). Já o Fator de Veículo foi calculado em função dos dados obtidos na contagem de tráfego, com uso dos Fatores de Equivalência de Carga (FEC) da USACE, seguindo o Manual de Estudos de Tráfego do DNIT/IPR 723 (DNIT, 2006). Além disso, o Fator de Frota foi determinado relacionando-se o número de veículos comerciais com o Volume Diário Médio (VDM).

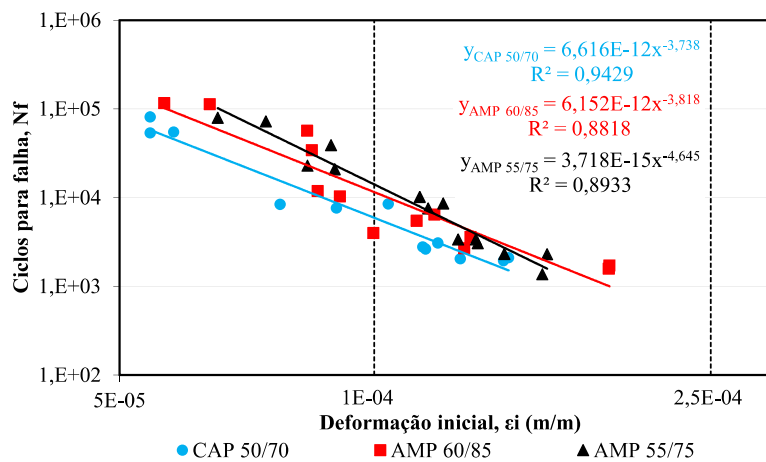
3. Resultados e discussões

Os valores médios de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração (RT) das misturas asfálticas empregadas nos segmentos experimentais estão apresentados na Tabela 4, juntamente com o desvio-padrão e coeficiente de variação das amostras ensaiadas.

Verifica-se que os valores de MR para as misturas com o CAP 50/70 e AMP 60/85 estão significativamente próximos, tendo diferença entre as misturas de apenas 1,71%. Já a mistura com AMP 55/75 apresentou um valor médio de MR 22,06% menor que as outras duas misturas. Se comparado com a literatura, os valores de MR para ligantes sem modificação ficam entre 4500 MPa e 7000 MPa, como visto nos trabalhos de Karami *et al.* (2018), Torres *et al.* (2022) e Kamdem, Adedeji & Mostafa (2023), no entanto, Almeida Jr. (2016) e Neumann (2021) também encontraram valores elevados para misturas com CAP 50/70 que variaram entre 7500 MPa à 9400 MPa. Já os trabalhos de Onofre (2012), Almeida Jr.

Tabela 4 • Módulo de Resiliência e Resistência à Tração.

Mistura	Módulo de Resiliência			Resistência à Tração		
	Média (MPa)	Desv-Pad. (MPa)	Coef. Var. (%)	Média (MPa)	Desv-Pad. (MPa)	Coef. Var. (%)
CAP 50/70	8043	451	5,61	2,38	0,11	4,79
AMP 60/85	7908	401	5,08	2,50	0,11	4,48
AMP 55/75	6235	299	4,80	2,28	0,06	2,42

**Figura 5 • Curvas de fadiga das misturas**

(2016) e Boeira (2018) mostram que misturas com ligantes modificados podem apresentar valores de MR entre 6.100 MPa e 10.000 MPa.

Com relação aos valores de RT, as três misturas apresentaram valores significativamente próximos, pois a diferença entre o maior e o menor valor médio de RT foi de apenas 9,73%. Ainda, observando os valores de desvio-padrão encontrados, pode ser desprezada a variação existente entre as misturas. Além disso, o valor mínimo de RT $\geq 0,65$ especificado na norma DNIT – ES 031 (DNIT, 2024) é atendido pelas três misturas. Bernucci *et al.* (2022) mencionam que misturas com módulo elevado apresentam valores de RT na ordem de 2,0 MPa à 3,0 MPa, como o encontrado por Vestena (2021). No entanto, trabalhos como de Carmo & Marques (2021) e Guerra *et al.* (2024) mostram valores na ordem de 1,1 MPa.

Com os resultados do ensaio de Fadiga à Tração por Compressão Diametral foi possível montar o gráfico da Figura 5, onde é verificada a relação entre ciclos necessários para falha da mistura (N_f) em laboratório e deformação de tração inicial (ε_i). Por meio desta relação entre N_f e ε_i , pode ser determinada a “curva de fadiga”. Desta curva, são obtidos os coeficientes K_1 e K_2 , utilizados como dados de entrada no programa MeDiNa.

Em termos de fadiga, infere-se que quanto maior o número de solicitações e maior a tensão/deformação, melhor comportamento terá esta mistura. Observando a Figura 5, verifica-se que a mistura com pior comportamento foi a mistura com CAP 50/70, que teve menores valores de N_f no intervalo de ε_i avaliado. Já as misturas com AMP 60/85 e AMP 55/75 tiveram curvas de fadiga significativamente similares, indicando que a mistura com AMP 55/75 teve uma ligeira vantagem em deformações iniciais menores; já a mistura com AMP 60/85 teve maior número de N_f com deformações iniciais maiores.

Para facilitar a visualização dos esforços gerados nas estruturas com a carga do eixo padrão, foram simuladas as estruturas dos Segmentos A, B e C no módulo Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) do programa MeDiNa. Foram obtidas as deformações específicas de tração no revestimento asfáltico, considerando vinte pontos de análise (dez desses pontos distribuídos na face superior os outros dez na face inferior, conforme recomendações de Franco & Motta (2020)). Assim, foram obtidas as deformações de tração na fibra inferior do revestimento para os Segmentos A, B e C. Os resultados indicaram, respectivamente, deformação de tração máxima (m/m) de $3,27 \times 10^{-4}$, $3,56 \times 10^{-4}$ e $1,45 \times 10^{-4}$. Logo, é esperada uma vida de fadiga inferior para os Segmentos A e B em relação ao Segmento C, justamente pela

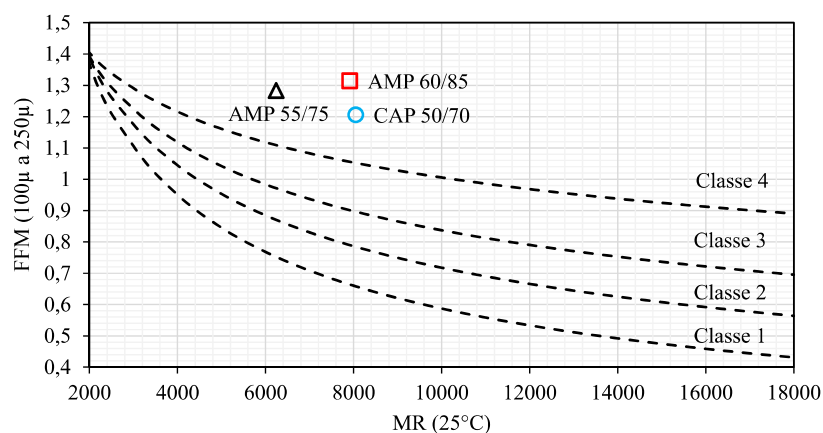


Figura 6 • Fator de Fadiga das Misturas pela classe do MeDiNa

espessura mais delgada dos revestimentos dos Segmentos A e B. Estas camadas, com menor espessura, proporcionam ao revestimento asfáltico maiores deformações de tração e, conseqüentemente, uma expectativa de menor vida de fadiga.

Percebe-se que as deformações de tração máximas simuladas nas estruturas, com o carregamento do eixo padrão, estão também dentro das faixas de deformação geradas nos corpos de prova de concreto asfáltico em laboratório, por meio do ensaio de compressão diametral. Ainda, nota-se que a deformação de tração máxima simulada pelo AEMC na mistura asfáltica do Segmento B tende a ser 8,69% maior do que no Segmento A e 2,46 vezes maior do que no Segmento C. Vale ressaltar que essa análise numérica no AEMC é feita baseada apenas na rigidez e na composição da estrutura, não sendo avaliadas as curvas de dano por fadiga dos materiais asfálticos.

Outra forma de avaliar as misturas deste trabalho pelo ensaio de fadiga por compressão diametral é mediante aplicação do Fator de Fadiga da Mistura (FFM), que pode ser verificado na Figura 6.

Analisando a Figura 6, verifica-se que as três misturas estão enquadradas na Classe 4 do MeDiNa. Isso sugere que as misturas podem ser utilizadas em vias com tráfegos maiores do que 1×10^7 (Franco & Motta, 2020). A mistura com AMP 60/85 teve melhor comportamento laboratorial frente à fadiga, pois apresentou maior valor de FFM atrelado ao módulo de resiliência de 7.908 MPa, sendo seguida pela mistura AMP 55/75, que teve um valor de FFM significativamente próximo da mistura com AMP 60/85, porém com menor valor de MR. Já a mistura com CAP 50/70 obteve o pior comportamento, pois teve valor de FFM = 1,206.

O alcance da Classe 4 de fadiga para a mistura asfáltica com CP 50/70 pode gerar certa desconfiância, todavia, os autores entendem que o valor de FFM da mistura com CAP 50/70 está compatível com valores encontrados na literatura. Para misturas utilizando CAP 50/70, Queiroz (2022) obteve FFM de 1,35, já Vestena (2021) encontrou FFM igual a 1,203 e Enriquez-Leon et al. (2023) obtiveram 1,615 e 1,776 para FFM de suas misturas. Já Custódio (2022) alcançou valores de FFM para misturas com CAP 50/70 variando entre 1,056 e 1,41.

Acredita-se que a ocorrência de bom desempenho laboratorial nos ensaios de fadiga para misturas asfálticas rígidas com ligantes convencionais está atrelada ao teste de fadiga por compressão diametral. Estes resultados não estão sendo observados quando as misturas com CAP 50/70 estão sendo testadas a fadiga pelo protocolo do ensaio à tração direta uniaxial (AASHTO TP-107) (AASHTO, 2016), cujo procedimento de aplicação de carga representa de maneira mais fidedigna àquele conduzido pelos carregamentos reais em pista. Todavia, o protocolo de fadiga por compressão diametral ainda é o mais difundido no Brasil, sendo empregado também no presente estudo.

Já o melhor comportamento das misturas com ligante modificado pode ser explicado pela presença de polímero no material aglutinante. Tal comportamento também foi verificado por Vestena (2021), que além de seus resultados de ensaios laboratoriais, fez um compilado de comportamentos de misturas estudadas autores como Specht (2004), Colpo (2014), Rossato (2015), Johnston et al. (2015) entre outros.

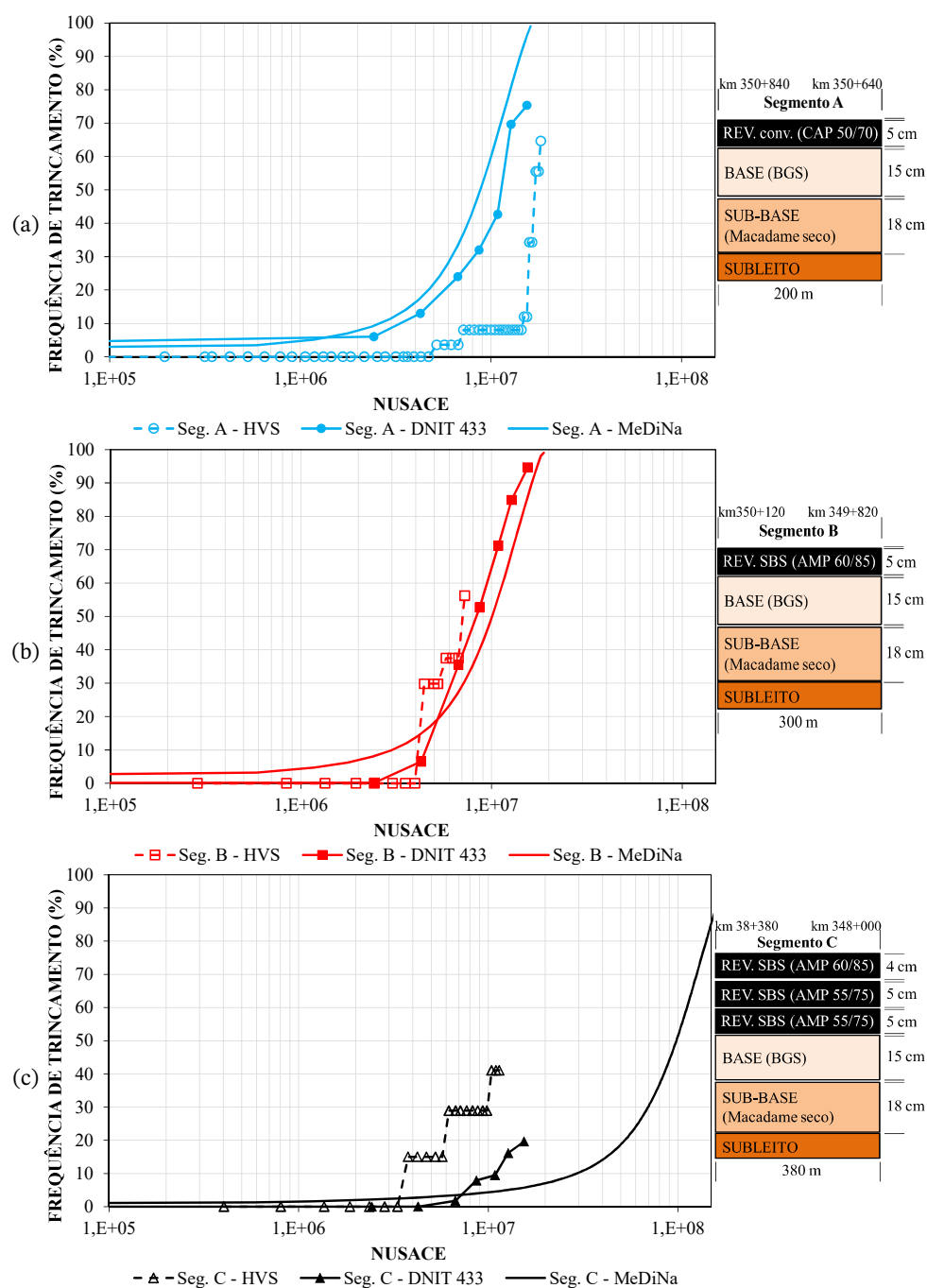


Figura 7 • Curva de desempenho à fadiga (a) Segmento A, (b) Segmento B, (c) Segmento C

O autor verificou que suas misturas e as misturas dos demais autores, com ligantes convencionais, tendem a ter valores de FFM entre 0,620 e 1,296. Já as misturas com ligantes modificados chegam a ter valores de FFM entre 1,309 e 1,642, logo, as misturas com ligantes modificados tendem a ter melhor comportamento à fadiga em comparação às misturas com ligante convencional.

Com os resultados obtidos em laboratório, foram realizadas simulações no programa MeDiNa. Estes dados foram confrontados com os levantamentos realizados em campo, tanto sob ação do simulador HVS quando sob ação do tráfego real. Na Figura 7a, Figura 7b e Figura 7c estão as evoluções dos trincamentos por fadiga nos Segmentos A, B e C respectivamente. Nas mesmas imagens estão as previsões de comportamento à fadiga realizadas no MeDiNa.

Observando os dados expostos na Figura 7a, Figura 7b e Figura 7c, verifica-se que a previsão de desempenho obtida pelo programa MeDiNa indica que os Segmentos A e B teriam baixa durabilidade,

ou seja, romperiam precocemente por fadiga. Esta projeção é justificada, uma vez que os dois segmentos foram construídos, propositalmente, com camada de revestimento muito delgada para o tráfego da via. Este fato também foi verificado nas simulações numéricas realizadas no AEMC, onde os Segmentos A e B apresentaram maiores valores de deformação de tração, se comparados ao Segmento C.

Na prática, a escolha por trabalhar com espessuras tão delgadas, em uma rodovia com volume de tráfego tão relevante como a BR-116/RS, pode ter dificultado a avaliação da durabilidade do material utilizado no revestimento asfáltico em campo. Tal fato também ocorreu no trabalho de [Bańkowski, Gajewski & Sybilski \(2013\)](#), que também tiveram dificuldades devido a camadas asfálticas de baixa espessura e cargas relativamente altas.

Percebe-se que o Segmento B, onde o revestimento asfáltico foi executado com AMP 60/85, apresentou pior desempenho em campo frente ao fenômeno de fadiga, mesmo tendo apresentado melhor comportamento nas análises de laboratório. Acredita-se que este fato pode ser justificado pela estrutura deficiente em relação ao tráfego pelo qual ela foi submetida. Além disso, [Pacheco \(2024\)](#) constatou degradação do polímero empregado no ligante AMP 60/85, utilizado na mistura asfáltica do Segmento B. O autor identificou que o parâmetro $R(\%)$, utilizado para analisar a existência ou não de modificação por polímero em ligantes, extraído da mistura usinada com AMP 60/85, teve uma redução de 71,28% em relação ao ligante virgem; ou seja, praticamente não apresentou polímero em sua constituição, sugerindo que houve degradação polimérica durante o processo de estocagem e execução da camada, sugerindo maior probabilidade deste material sofrer com o fenômeno de fadiga.

Além disso, o uso das camadas excessivamente delgadas no revestimento (5 cm) em campo não permitiu identificar as diferenças entre as misturas com CAP 50/70 e AMP 60/85, uma vez que ambas as estruturas não resistiram aos esforços transmitidos pela via por um período significativo de tempo. Em outras palavras, pode-se dizer que a escassez de espessura nos segmentos A e B, expuseram os revestimentos a deformações extremamente elevadas, condição extrema que inviabilizou a avaliação da sensibilidade destes materiais à ruptura por fadiga em condições a que o pavimento está submetido costumeiramente.

Quando analisado apenas a solicitação com o simulador HVS, o Segmento A, feito com CAP 50/70, apresentou melhor desempenho em relação aos outros dois segmentos, o que não era esperado, principalmente em relação ao Segmento C que possui espessura de revestimento quase três vezes maior que o Segmento A. No trabalho de [Fritzen \(2005\)](#), o autor menciona a ocorrência de pouca diferença no número de ciclos e na vida útil entre as misturas com ligante convencional e mistura com ligante modificado solicitado pelo HVS. Ainda, tal desempenho superior no Segmento A em relação aos Segmentos B e C pode ser explicado devido ao fato da solicitação no Segmento A ter ocorrido entre os meses de março e maio, com temperatura média diária no pavimento de 23,5 °C, enquanto a temperatura média nos Segmentos B e C foram respectivamente de 17,8 °C e 16,0 °C, fazendo com que as misturas nas temperaturas mais baixas ficassem mais rígidas, e consequentemente com maior possibilidade de trincamento por fadiga. Além disso, o Segmento A teve aumento de carga gradativa nas primeiras idades, possivelmente acarretando na estabilização da estrutura e acomodação das camadas de forma gradual.

Já durante a solicitação com o tráfego real, verificou-se que o Segmento C teve o melhor desempenho se comparado aos Segmentos A e B, o que já era esperado, pois o Segmento C foi construído com espessura de revestimento maior e com misturas que tiveram melhores comportamentos em laboratório. Tal desempenho superior do Segmento C com maior espessura também foi observado por [Wu, Harvey & Signore \(2012\)](#). Os autores avaliaram dois tipos de pavimentos, um com 6,3 cm de espessura e outro com 11,4 cm de espessura. A estrutura com espessura maior resistiu cerca de seis vezes mais ao fenômeno de fadiga que o de menor espessura, no entanto os autores alertam que o aumento de espessura também levou a uma deformação permanente 2,68 vezes maior que o pavimento de menor espessura.

Observando a Figura 7a, verifica-se que as curvas de desempenho à fadiga do Segmento A, executado com CAP 50/70, obtidas durante as solicitações pelo tráfego real e prevista pela simulação no programa MeDiNa tiveram comportamentos significativamente semelhantes ao longo de toda a curva. Além disso, o Segmento A teve desempenho superior ao previsto pela simulação no programa MeDiNa, tanto pelos dados de fadiga obtidos durante as solicitações pelo tráfego real, quanto pelas solicitações do simulador de tráfego HVS; no entanto, o desempenho foi consideravelmente melhor durante o uso do

HVS. Acredita-se que o fato de o simulador ter iniciado com carregamento inferior pode ter influenciado no dano do material.

Na Figura 7b, observa-se que o Segmento B teve a melhor representação na comparação entre as três metodologias de avaliação, pois o comportamento da curva de desempenho durante a solicitação do simulador de tráfego HVS e da solicitação do tráfego real foram significativamente semelhante ao previsto pela simulação no programa MeDiNa, tendo desempenhos levemente inferiores ao que foi obtido pela simulação.

No Segmento C, apresentado na Figura 7c, a curva obtida pela solicitação do simulador HVS mostrou pior desempenho em relação à obtida pelo tráfego real. Na solicitação com o HVS, foi obtido 15% de frequência de trincamento com $N_{USACE} = 3,78 \times 10^6$; já para a solicitação do tráfego real, obteve-se tal porcentagem com $N_{USACE} = 1,24 \times 10^7$. Ou seja, foram necessárias 3,29 vezes mais solicitações com o tráfego real para obter a mesma porcentagem de trincamento encontrada com o HVS.

Ainda, verifica-se que o comportamento da curva de desempenho obtida com a solicitação do tráfego real no Segmento C, considerando dados dos primeiros 2 anos de monitoramento, foi a que mais se aproximou da obtida com o programa MeDiNa para este período. No entanto, o MeDiNa está prevendo que o desempenho em campo do pavimento com maior robustez não está compatível com o tráfego solicitante, que está danificando o pavimento antes do previsto. A continuidade do monitoramento e os dados de novos levantamentos de campo permitirá interpretar se essa discrepância nos resultados irá continuar ao longo do período de projeto. Já a curva de desempenho obtida com o simulador de tráfego HVS mostrou desempenho significativamente inferior ao previsto no MeDiNa e ao observado com o tráfego real. Este fato sublinha algumas incertezas sobre o processo de avaliação acelerada de segmentos experimentais com o simulador HVS, uma vez que a característica da degradação pela qual o pavimento é submetido com o simulador ainda não tem correlação definida com o tráfego real, especialmente quando o mecanismo de ruptura avaliado é o trincamento por fadiga.

4. Considerações finais

Com base nos resultados laboratoriais, é possível concluir que a mistura executada com o ligante asfáltico AMP 60/85 teve melhor comportamento frente ao fenômeno de fadiga em laboratório, quando comparada às misturas elaboradas com o CAP 50/70 e com AMP 55/75, conforme o esperado.

Com relação à frequência de trincamento obtida com o simulador de tráfego HVS, observou-se correlação com o comportamento identificado sob ação do tráfego real apenas no Segmento B. Nos Segmentos A e C, as curvas obtidas com a solicitação do HVS mostraram, respectivamente desempenho superior e inferior, quando comparado as curvas obtidas com o tráfego real. Acredita-se ser necessários o estabelecimento de processos metodológicos de aplicação do HVS, principalmente aqueles relacionados à avaliação de trincamento e à aplicação de cargas, a depender do objetivos com os quais o simulador de tráfego HVS será empregado. Além disso, a temperatura média nos períodos em que ocorreram as solicitações com o simulador HVS, e o padrão de carregamento diferente utilizado no Segmento A em relação aos Segmentos B e C, podem ter interferido na análise do desempenho do pavimento em campo.

Relacionando as curvas obtidas pelo programa MeDiNa com as curvas obtidas a partir da solicitação do tráfego real, verifica-se que nos Segmentos A e B, que possuem uma espessura de revestimento deficiente, o desempenho das misturas em campo foi melhor do que o previsto. Mesmo assim, o sistema identificou o trincamento precoce das estruturas, fato que efetivamente ocorreu sob ação do tráfego real. Já no Segmento C, que foi construído de acordo com o projeto da via, até o atual estágio de monitoramento (dois anos após a abertura do tráfego), o desempenho da estrutura está de acordo com o previsto pela simulação no programa, denotando, até o momento, que o MeDiNa está conseguindo prever o desempenho em campo dos pavimentos com robustez compatível ao tráfego solicitante.

Quando comparadas as curvas previstas pelo programa MeDiNa com as curvas obtidas a partir da solicitação do HVS, constata-se uma variação na previsão de desempenho das estruturas, uma vez que no Segmento A, o desempenho foi melhor do que o previsto; no Segmento B foi de acordo com o previsto e, no Segmento C, foi inferior ao que foi previsto pelo programa MeDiNa. Este fato comprova a necessidade do desenvolvimento de métodos e processos adaptados ao emprego do simulador HVS.

Em campo, a estrutura extremamente delgada com a mistura com AMP 60/85 apresentou desempenho inferior à estrutura (igualmente deficiente de revestimento) com a mistura CAP 50/70. Tal fato pode ser pela verificação feita por Pacheco (2024) que identificou fortes indícios de degradação polimérica no ligante asfáltico AMP 60/85. Além disso, entende-se que a espessura de 5 cm de revestimento prejudicou a análise, uma vez que o tráfego elevado da rodovia impediu que este comparativo fosse realizado de maneira representativa.

Conclui-se, por fim, que a excessiva redução da espessura de revestimento nos Segmentos A e B (sugerida pelos autores), para acelerar o processo de trincamento, pode ter inviabilizado a análise do desempenho dos materiais em campo, visto que a espessura de revestimento não estava de acordo com a solicitação que a estrutura sofreu. O programa MeDiNa comprovou tal verificação, mostrando que a durabilidade nos referidos segmentos seria extremamente menor do que a prevista no Segmento C (segmento que possui a estrutura calculada em projeto).

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes (DNIT), do Exército Brasileiro, da empresa Mágn Engenharia, da UnB e da UFSM.

Declaração de contribuição de autoria CRediT

Mauricio Silveira dos Santos: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Visualização, Escrita — versão inicial, Escrita — revisão e edição; *Luciano Pivoto Specht*: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise formal, Obtenção de financiamento, Recursos, Supervisão, Validação, Escrita — revisão e edição; *Deividi da Silva Pereira*: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise formal, Obtenção de financiamento, Recursos, Supervisão, Validação, Escrita — revisão e edição; *Lucas Dotto Bueno*: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise formal, Investigação, Validação, Visualização, Escrita — versão inicial, Escrita — revisão e edição; *Márcio Muniz de Farias*: Obtenção de financiamento, Administração de projetos, Recursos, Supervisão; *Luiz Guilherme Rodrigues de Mello*: Obtenção de financiamento, Administração de projetos, Recursos, Supervisão; *Lorenzo Chaves Pacheco*: Curadoria de dados, Investigação, Metodologia; *Paula Taiane Pascoal*: Investigação, Metodologia, Escrita — revisão e edição.

Uso de tecnologia assistida por inteligência artificial

Os autores declaram que nenhuma ferramenta de inteligência artificial foi usada na pesquisa aqui relatada ou na preparação deste artigo.

Declaração de conflitos de interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesses.

Declaração de disponibilidade de dados

Os conjuntos de dados, modelos e/ou códigos gerados e analisados neste estudo estão disponíveis no repositório Manancial, o repositório digital da UFSM, através do link <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/36701>.

Referências

- AASHTO (2016). *AASHTO TP 107-14: Standard method of test for determining the damage characteristic curve of asphalt mixtures from direct tension cyclic fatigue tests*. Washington: AASHTO.
- ABNT (2016). *NBR 6458 – Anexo B – Solo – Grãos de solo que passam na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Almeida Jr., P. (2016). Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem. Mestrado (dissertação), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. URL: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7925> [visitado 11.03.2026].

- Azambuja, D. (2004). Estudo de recapeamentos asfálticos de pavimentos através de ensaios acelerados. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. URL: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/5392> [visitado 11.03.2026].
- Bankowski, W., M. Gajewski, & D. Sybilski (2013). Analysis of fatigue damage on test sections submitted to HVS loading. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 8(4), 255–262. DOI:10.3846/bjrbe.2013.33.
- Ben, L. H., P. T. Pascoal, M. Baroni, M. S. Santos, & L. P. Specht (2024). Comportamento resiliente de solo compactado frente a diferentes condições de ensaio e histórico de tensões. In *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Balneário Camboriú, SC. DOI:10.47094/COBRAMSEG2024/673.
- Bernucci, L. L. B., L. M. Motta, J. A. Ceratti, & J. B. Soares (2022). *Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros* (2 ed.). Rio de Janeiro: Petrobras.
- Boeira, F. (2018). *Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados*. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Bueno, L. (2016). Avaliação deflectométrica e de rigidez: Estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS. Mestrado (dissertação), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. URL: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7926> [visitado 06/03/2026].
- Carmo, C. & G. Marques (2021). Avaliação comparativa de propriedades mecânicas de misturas asfálticas simples e compostas. *Brazilian Journal of Development* 7(8), 84306–84329. DOI:10.34117/bjdv7n8-579.
- Colpo, G. (2014). Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. URL: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/114463> [visitado 11.03.2026].
- Custódio, D. (2022). Caracterização à fadiga de misturas asfálticas por compressão diametral e comparação com os resultados do ensaio de tração-compressão. Mestrado (dissertação), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. URL: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/25760> [visitado 11.03.2026].
- DNER (1994a). *DNER-ME 053: Misturas betuminosas - Percentagem de betume*. Rio de Janeiro: DNER.
- DNER (1994b). *DNER-ME 078: Agregado graúdo - Adesividade a ligante betuminoso*. Rio de Janeiro: DNER.
- DNER (1994c). *DNER-ME 086: Agregados - Determinação do índice de forma*. Rio de Janeiro: DNER.
- DNER (1994d). *DNER-ME 089: Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio*. Rio de Janeiro: DNER.
- DNER (1995). *DNER-ME 043: Misturas betuminosas a quente - Ensaio Marshall*. Rio de Janeiro: DNER.
- DNER (1996). *DNER - ME 193: Materiais betuminosos líquidos e semissólidos - Determinação da densidade e da massa específica*. Rio de Janeiro: DNER.
- DNER (1997). *DNER-ME 054: Equivalente de areia*. Rio de Janeiro: DNER.
- DNER (1998a). *DNER-ME 035: Agregados - Determinação da abrasão Los Angeles*. Rio de Janeiro: DNER.
- DNER (1998b). *DNER-ME 081: Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro: DNER.
- DNIT (2006). *DNIT-IPR 723: Manual de estudos de tráfego*. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2013). *DNIT-ME 164: Solos - Compactação utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2016). *DNIT-ME 172: Solos - Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhada*. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2018a). *DNIT-ME 135: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência*. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2018b). *DNIT-ME 136: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2018c). *DNIT-ME 183: Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada*. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2020). *DNIT-ME 427: Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas*. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2021). *DNIT-PRO 433: Pavimentação - Levantamento do percentual de área trincada e de afundamento de trilha de roda de pavimento asfáltico*. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias.
- DNIT (2022). *DNIT-ES 141: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente*. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2023a). *DNIT-CLA 259: Solos - Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias*. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2023b). *DNIT-ME 443: Pavimentação - Solos - Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos*. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2024). *DNIT-ES 031: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico*. Rio de Janeiro: DNIT.
- du Plessis, L., A. Ulloa-Calderon, J. Harvey, & N. Coetzee (2017). Accelerated pavement testing efforts using the heavy vehicle simulator. *International Journal of Pavement Research and Technology* 11(4), 327–338. DOI:10.1016/j.ijprt.2017.09.016.
- Enriquez-Leon, A. J., M. L. Rocha, P. H. Osmari, L. F. Leite, L. M. Barros, F. T. S. Aragão, & L. A. Nascimento (2023). Avaliação da fadiga em misturas asfálticas: Uma abordagem baseada em índices reológicos. In *48º Reunião Anual de Pavimentação*

- (RAPv), Foz do Iguaçu, PR. ABDER.
- Franco, F. & L. Motta (2020). *Manual de Ajuda - Programa MeDiNa versão 1.1.5*. Rio de Janeiro: MeDiNa.
- Fritzen, M. (2005). Avaliação de soluções de reforço de pavimentos asfálticos com simulador de tráfego na rodovia Rio Teresópolis. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Gonçalves, F. (2002). *Estudo do desempenho de pavimentos flexíveis a partir da instrumentação e ensaios acelerados*. Doutorado (tese), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. URL: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/2300> [visitado 11.03.2026].
- Guerra, T. D., A. F. Lucena, D. C. Beserra, A. M. Mendonça, O. M. Melo Neto, & A. O. Justo (2024). Efeitos da adição do óleo de canola nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas. *Transportes* 31(3), e2857. DOI:10.58922/transportes.v31i3.2857.
- Guimarães, A. (2009). *Um método mecanístico empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Hugo, F. & A. Martin (2004). Significant findings from full-scale accelerated pavement testing. NCHRP Synthesis 325, Transportation Research Board. DOI:10.17226/23380.
- Johnston, M., G. Colpo, L. Brito, R. Ribeiro, & J. A. Ceratti (2015). Estudo de fadiga em laboratório de misturas asfálticas mornas com utilização de ensaios de tração indireta por compressão diametral. In *XVIII Congresso Ibero Latinoamericano del Asfalto*, Bariloche, Argentina. Asociación Española de la Carretera.
- Kamdern, R., J. Adedeji, & M. Mostafa (2023). A study on indirect tensile strength for the determination of resilient modulus of warm mix asphalt. *Transportation Research Procedia* 69, 783–790. DOI:10.1016/j.trpro.2023.02.236.
- Karami, M., H. Nikraz, S. Sebayang, & L. Irianti (2018). Laboratory experiment on resilient modulus of BRA modified asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology* 11(1), 38–46. DOI:10.1016/j.ijprt.2017.08.005.
- Lee, S., T. Le, & Y. Kim (2023). Full-scale and laboratory investigations on the performance of asphalt mixture containing recycled aggregate with low viscosity binder. *Construction & Building Materials* 367, 130283. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.130283.
- Mattos, J. R. G. (2014). *Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação rodoviária BR-290/RS: a implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul*. Doutorado (tese), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. URL: <https://hdl.handle.net/10183/103728> [visitado 06/03/2026].
- Medina, J. & L. Motta (2015). *Mecânica dos pavimentos* (3 ed.). Rio de Janeiro: Editora Interciências.
- Motta, L. (1991). *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaios de Cargas Repetidas*. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Neumann, G. (2021). Análise do processo de autorregeneração de misturas asfálticas incorporadas com agentes rejuvenescedores encapsulados. Mestrado (dissertação), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora. URL: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/13523> [visitado 11.03.2026].
- Onofre, F. (2012). Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. URL: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/11166> [visitado 11.03.2026].
- Pacheco, L. (2024). Impact of asphalt mixture plant production on the rheological properties and performance of asphalt binders. Monografia (Bacharelado), Universidade Federal de Santa Maria. URL: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/33611> [visitado 11.03.2026].
- Pezo, R., G. Claros, W. R. Hudson, & K. H. Stokoe II (1992). Development of reliable resilient modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design. Relatório técnico, Center for Transportation Research, University of Texas, Austin. URL: <https://library.ctr.utexas.edu/Presto/catalogid=2802> [visitado 06.03.2026].
- Queiroz, R. (2022). Avaliação do dano por fadiga de misturas asfálticas modificadas por adição de polímero a partir do modelo S-VECD. Mestrado (dissertação), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. URL: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/27717> [visitado 06.03.2026].
- Rossato, F. (2015). Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes. Mestrado (dissertação), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. URL: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7890> [visitado 06.03.2026].
- Rust, F. C., M. A. Smit, I. Akhalwaya, G. J. Jordaan, & L. du Plessis (2022). Evaluation of two nano-silane-modified emulsion stabilised pavements using accelerated pavement testing. *International Journal of Pavement Engineering* 23(5), 1339–1352. DOI:10.1080/10298436.2020.1799210.
- Sagrilo, A. (2024). *Britas graduadas simples: Influência da litologia, estrutura interna e umidade na deformabilidade*. Doutorado (tese), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. URL: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/31905> [visitado 06.03.2026].
- Specht, L. (2004). *Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus*. Doutorado (tese), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. URL: <https://hdl.handle.net/10183/5192> [visitado 06.03.2026].
- Tong, B., J. Habbouche, G. W. Flintsch, & B. K. Diefenderfer (2023). Rutting performance evaluation of BMD surface mixtures with conventional and high RAP contents under full-scale accelerated testing. *Materials* 16(24), 7611. DOI:

10.3390/ma16247611.

- Torres, P. R., A. E. Lucena, T. M. de Sousa, M. M. Krau, P. M. Luz, & L. de Lima Barbosa (2022). Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual. *Transportes* 30(1), 2585. URL: <https://doi.org/10.14295/transportes.v30i1.2585>.
- Vestena, P. (2021). Segmentos experimentais na BR 116/RS empregando TLAflex, HiMA e 55/75-e (SBS). Mestrado (dissertação), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. URL: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/24399> [visitado 06.03.2026].
- Vestena, P. M., L. D. Bueno, S. L. Schuster, L. P. Specht, D. da Silva Pereira, P. S. Ilha, L. C. Pacheco, H. O. Coelho, R. R. Hallal, & J. A. S. Echeverria (2024). Advanced characterization of lab-produced vs. plant-produced asphalt mixtures from Southern Brazil. *Construction and Building Materials* 456, 139227. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139227.
- Victorino, D. (2008). Análise de desempenho de um pavimento flexível da rodovia BR-290/RS solicitado por um simulador de tráfego móvel. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. URL: <https://hdl.handle.net/10183/16206> [visitado 06/03/2026].
- Waka Kotahi (2022). The Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility (CAPTIF) Road Research Centre carries out accelerated road pavement testing. URL: <https://www.nzta.govt.nz/roads-and-rail/road-composition/road-pavements/captif/> [visitado 26.02.2025].
- Wu, R., J. Harvey, & J. Signore (2012). Cracking and rutting performance of composite pavements under testing with heavy vehicle simulator. *Transportation Research Record* 2304(1), 177–184. DOI: 10.3141/2304-20.