

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/697

## Proposição de um Índice para Seleção de Misturas Asfálticas com relação à Área Trincada Prevista pelo MeDiNa

Victória Nunes Ramos

Estudante de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,  
victorianunesramos@gmail.com

Luciano Pivoto Specht

Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, luspecht@ufsm.br

Silvio Lisboa Schuster

Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, silviolschuster@ufsm.br

Deividi da Silva Pereira

Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, dsp@ufsm.br

Henrique Otto Coelho

Analista em Infraestrutura de Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Pelotas, Brasil, henrique.coelho@dnit.gov.br

**RESUMO:** A adequação das misturas asfálticas ao nível de tráfego atuante em determinada estrutura é uma das condições determinantes para atingir limites aceitáveis de trincamento por fadiga. Nesse sentido, com base em um banco de dados de 17 misturas asfálticas do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária da Universidade Federal de Santa Maria (GEPPASV/UFSM), este trabalho buscou um indicador capaz de prever níveis de área trincada simulada pelo software MeDiNa, visando uma seleção mais racional de misturas asfálticas. Foram fixadas 3 estruturas de pavimento, adequadas para tráfegos médio, pesado e extremamente pesado. Verificou-se que a associação do módulo de resiliência e do fator de fadiga da mistura (ambos em ensaios sob compressão diametral), por meio do produto entre eles ( $MR*FFM$ ), forneceu correlações regulares com as áreas trincadas previstas. A pesquisa permitiu observar que, para que não superem o limite de 30% de área trincada, as misturas devem atingir valores de  $MR*FFM$  acima de 7307,49 MPa sob tráfego médio, 9819,69 MPa sob tráfego pesado, e 6604,76 MPa sob tráfego extremamente pesado. Dessa forma, é possível utilizar as simulações para selecionar a mistura asfáltica de acordo com o nível de área trincada, com base em apenas 2 ensaios laboratoriais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Área trincada prevista, MeDiNa, Módulo de Resiliência, Fator de Fadiga da Mistura, Seleção de misturas asfálticas.

**ABSTRACT:** Adapting asphalt mixtures to the traffic levels on a given structure is one of the determining conditions for reaching acceptable fatigue cracking limits. Therefore, based on a database of 17 asphalt mixtures from the Paving and Road Safety Studies and Research Group at the Federal University of Santa Maria (GEPPASV/UFSM), this study sought an indicator capable of predicting cracked area levels simulated by the MeDiNa software, aiming for a more rational selection of asphalt mixtures. Three pavement structures were chosen, suitable for medium, heavy and extremely heavy traffic. It was found that the association of the resilience modulus and the fatigue factor of mixture (both in tests under diametral compression), using the product between them ( $MR*FFM$ ), provided regular correlations with the predicted cracked areas. The research showed that, in order not to exceed the 30% cracked area limit, the mixtures must reach  $MR*FFM$  values above 7307.49 MPa under medium traffic, 9819.69 MPa under heavy traffic, and 6604.76 MPa under extremely heavy traffic. It is therefore possible to use the simulations to select the asphalt mix according to the cracked area level, based on just 2 laboratory tests.

**KEYWORDS:** Predicted cracked area, MeDiNa, Resilient Modulus, Fatigue Factor of Mixture, Selection of asphalt mixtures.

## 1 INTRODUÇÃO

As misturas asfálticas utilizadas como revestimento de pavimentos são projetadas para resistirem aos fenômenos de deformação permanente e fadiga (Papagiannakis; Masad, 2008). O desempenho adequado frente a esses fenômenos é imperativo para retardar a evolução de manifestações patológicas, promovendo segurança, conforto e redução de custos operacionais para os usuários, e diminuindo a emissão de gases de efeito estufa (Azevedo; Junior; Arantes, 2021; Bernucci et al., 2022; Schuster et al., 2023). A seleção de materiais que atendam às especificações técnicas, a dosagem correta da mistura asfáltica e a utilização de métodos de dimensionamento de pavimentos mecanístico-empíricos são fatores que contribuem para que esse desempenho satisfatório ocorra em campo (Bernucci et al., 2022).

No Brasil, a fadiga é caracterizada em laboratório sob compressão cíclica diametral conforme DNIT 183/2018 - ME (DNIT, 2018a) e traduzida para valores de área trincada em simulações de pavimentos pelo novo método de dimensionamento (MeDiNa) (DNIT, 2023). Nesse sentido, o fenômeno de fadiga é provocado pela passagem repetida do tráfego, que provoca acúmulo de dano na camada asfáltica. A evolução das microtrincas geradas para trincas de maior extensão e abertura, portanto, culmina na ruptura do material (Di Benedetto et al., 2004; Tayebali et al., 1994; Yoder; Witczak, 1975).

A assertividade na seleção de misturas com relação à fadiga aumenta a probabilidade de que se obtenha um desempenho adequado quando aplicadas em uma estrutura de pavimento. Atualmente, essa seleção é realizada por meio de indicadores de desempenho auferidos por ensaios laboratoriais, os quais buscam simular as condições de campo (Cao; Mohammad; Barghabany, 2018; Lee; Lee; Le, 2023).

No MeDiNa, foram criadas 4 classes de fadiga para selecionar misturas asfálticas de acordo com o nível de tráfego da rodovia projetada, confrontando os valores do módulo de resiliência (DNIT, 2018b) e de fator de fadiga da mistura proveniente do ensaio de fadiga por compressão diametral, entre as deformações de 100 e 250  $\mu\text{m}$  (DNIT 2018a). O manual do programa destaca que é necessária a observação da rigidez associada ao parâmetro de danificação, visto que, por exemplo, misturas mais rígidas diminuem as tensões de tração na base do revestimento, mas podem possuir menor vida de fadiga (DNIT, 2023).

Observando a literatura atinente ao tema, no entanto, é possível perceber que misturas de mesma classe de fadiga podem gerar valores de área trincada bastante distintos quando aplicadas em uma estrutura de pavimento idêntica (Custódio, 2022; Guabiroba et al., 2023; Oliveira, 2019; Vestena, 2021). Apesar da relação entre a rigidez e um parâmetro de fadiga ser necessária na seleção da mistura asfáltica, as classes de fadiga propostas pelo MeDiNa por vezes não são capazes de discretizar os materiais.

Desse modo, este trabalho buscou um indicador capaz de prever os níveis de área trincada simulada pelo MeDiNa, objetivando a seleção racional de misturas asfálticas quanto ao fenômeno de fadiga. Além disso, visou identificar limites mínimos a serem atingidos pelas misturas asfálticas, considerando 3 níveis de tráfego.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Planejamento da Pesquisa

A Figura 1 apresenta as etapas da realização da pesquisa. O trabalho inicia com a organização dos dados de misturas asfálticas a quente, seguido de simulações de pavimentos. As etapas seguintes consistem em buscar um indicador adequado para prever a área trincada obtida nas simulações; separar esse indicador em grupos de área trincada; e, por fim, identificar limites mínimos a serem atingidos pelas misturas.

### 2.2 Estruturação do Banco de Dados

A pesquisa partiu da estruturação do banco de dados de misturas asfálticas a quente do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária, da Universidade Federal de Santa Maria (GEPPASV/UFSM, no Rio Grande do Sul, Brasil). Atualmente, existem 178 misturas asfálticas catalogadas, com propriedades de agregados, ligantes asfálticos, dosagem, rigidez e danificação por deformação permanente e fadiga. Mais detalhes podem ser visualizados na dissertação de Nunes-Ramos (2023). Para essa pesquisa, foram selecionadas as misturas asfálticas com caracterização por ensaios sob compressão diametral, necessários para as simulações no MeDiNa.

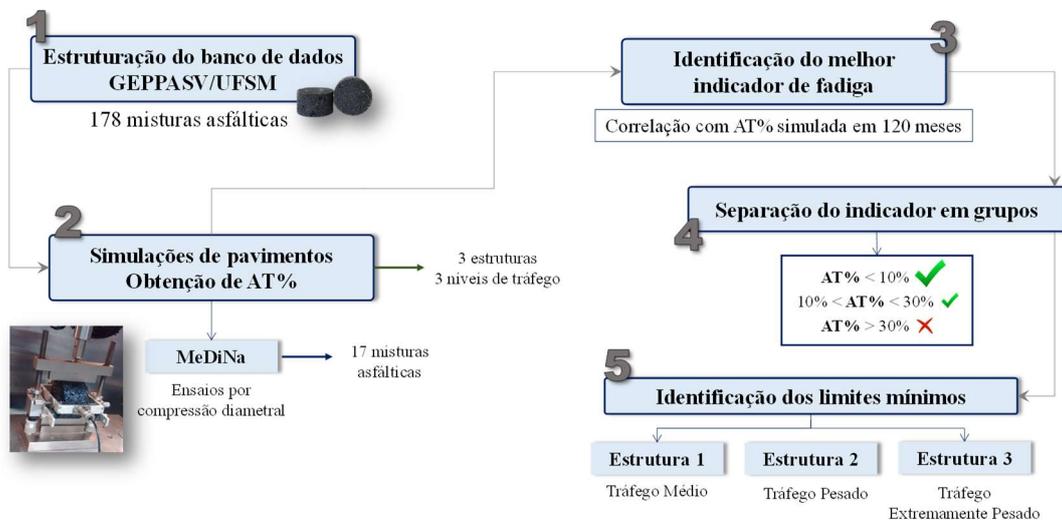


Figura 1. Planejamento da pesquisa

## 2.3 Obtenção da Área Trincada Simulada

O parâmetro definido como alvo para a determinação do melhor indicador de fadiga das misturas foi a área trincada (AT%) simulada ao final de 120 meses. Assim, as seções seguintes apresentam a caracterização das misturas asfálticas quanto à rigidez e ao dano por fadiga, bem como as premissas adotadas nas simulações.

### 2.3.1 Caracterização da Rigidez e do Dano por Fadiga das Misturas Asfálticas

A rigidez das misturas influencia no cálculo das tensões e deformações. Assim, foi realizado o ensaio de módulo de resiliência (MR) a 25°C (DNIT, 2018b; DNIT 2018c), com carregamento cíclico de 1 Hz (0,1 segundo de carga e 0,9 segundos de repouso). As amostras são cilíndricas, com 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, e 4% de volume de vazios. O MR pode ser calculado pela Equação 1.

$$MR = \frac{F}{t * \Delta} * (0,9976\mu + 0,2692) \quad (1)$$

Onde MR é o módulo de resiliência em MPa, F é a carga vertical em N,  $\Delta$  é o deslocamento resiliente registrado em mm, t é a altura do corpo de prova em mm e  $\mu$  é o coeficiente de Poisson, adotado como 0,3.

A área trincada depende do cálculo do dano acumulado na camada asfáltica, com caracterização da mistura pelo ensaio de fadiga por compressão diametral. O teste foi realizado na mesma temperatura e frequência do MR, e em amostras de mesmas características físicas (DNIT, 2018a). O ensaio ocorreu sob tensão controlada, com 4 níveis de tensão e, no mínimo, 12 corpos de prova. Os níveis de tensão são porcentagens da resistência à tração da mistura (entre 5 e 40% do RT) (DNIT, 2018c). Os dados de entrada para o MeDiNa são os coeficientes k1 e k2 da curva de fadiga dada pela Equação 2. A área abaixo da curva de fadiga entre as deformações de 100  $\mu$ m e 250  $\mu$ m resulta no Fator de Fadiga da Mistura (FFM).

$$N = k_1 * \varepsilon_t^{k_2} \quad (1)$$

Onde N é o número de ciclos até a ruptura completa da amostra (vida de fadiga), k1 e k2 são as constantes experimentais, e  $\varepsilon_t$  é a deformação de tração inicial do ensaio em cada nível de tensão.

### 2.3.2 Análise mecânica de pavimentos

A fadiga está ligada às deformações de tração na camada asfáltica, que dependem, além das propriedades da mistura, da estrutura que sustenta esse material (Nascimento, 2015; Underwood; Baek; Kim, 2012). Assim,

foi obtida a área trincada simulada pelo MeDiNa (versão 1.1.7 de março/2023) em 120 meses, para permitir a correlação com indicadores das misturas. Foram propostos 3 cenários, com variação da espessura do revestimento (Figura 2).

A definição das camadas e suas rigidezes partiram da retroanálise de pavimentos reais (Bordin, 2020; Bueno, 2019; Santos, 2015; Scherer, 2018). A base é constituída por 15 cm de brita graduada simples (módulo de 202 MPa e coeficiente de Poisson de 0,3); 20 cm de sub-base granular (módulo de 197 MPa e coeficiente de Poisson de 0,4); e subleito em solo (módulo de 84 MPa e coeficiente de Poisson de 0,45). As espessuras de revestimento em concreto asfáltico foram de 5 cm (E1), 10 cm (E2) e 15 cm (E3).

O tráfego foi compatibilizado com as espessuras de concreto asfáltico, conforme as recomendações do método vigente de dimensionamento do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (DNER, 1981). Determinou-se um crescimento de 3% ao ano, visto ser uma taxa comum nos estudos de tráfego para o Brasil. Assim, para 5 cm de revestimento, o número de solicitações  $N$  acumulado de foi de  $2,51 \times 10^6$  repetições (a partir de um volume médio diário – VDM – de 600 veículos por dia). Para 10 cm, adotou-se um  $N$  de  $1,5 \times 10^7$  repetições (VDM de 3500) e para 15 cm um  $N$  de  $5,0 \times 10^7$  (VDM de 11950). Os níveis de tráfego são classificados como médio, pesado e extremamente pesado por Ceratti, Bernucci e Soares (2015). Foi considerado um Sistema Arterial Primário, com nível de confiabilidade de 85%. O dano por fadiga é convertido em percentual de área trincada pela função de transferência adaptada de Fritzen (2016).

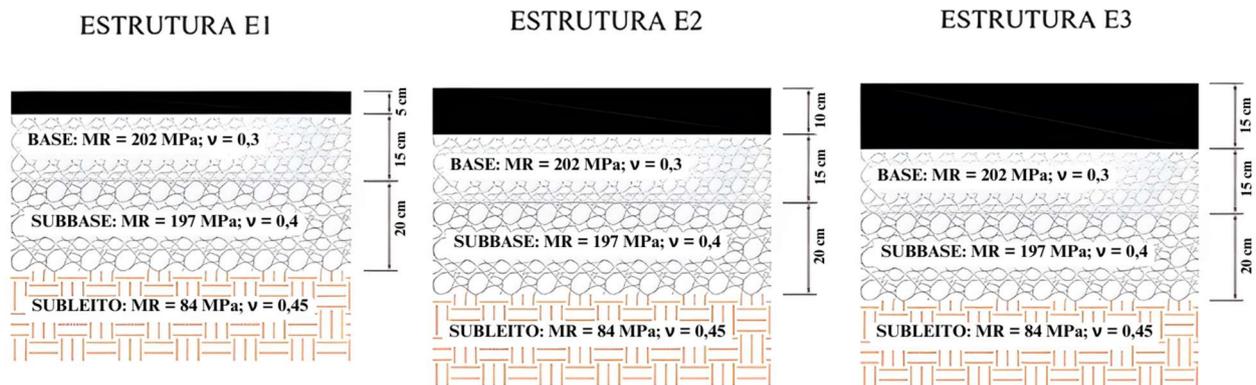


Figura 2. Estruturas consideradas nas simulações de pavimentos

## 2.4 Identificação dos Melhores Indicadores de Fadiga e Separação em Níveis de Área Trincada

Para identificar um parâmetro capaz de prever o nível de trincamento das simulações, foram testadas diferentes correlações com o valor de AT% em 120 meses. Assim, buscou-se o indicador com maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) nas correlações dos 3 cenários simulados.

Definido o indicador, as misturas asfálticas foram separadas em grupos de área trincada: abaixo de 10%, entre 10% e 30% e acima de 30%. O primeiro limite é o ponto de corte referenciado pelo Catálogo de Soluções de Manutenção para Pavimentos Flexíveis do DNIT (Relatório Técnico 002) (DNIT; DPP; CGPLAN, 2014), e o segundo é o valor máximo de área trincada permitido segundo o MeDiNa (DNIT, 2023). Assim, foram calculados os intervalos de confiança do parâmetro selecionado, com o método *Bootstrap*, permitindo visualizar o limite a ser atingido pelas misturas para obterem um determinado nível de trincamento.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Atualmente, o banco de dados do GEPPASV contém 17 misturas asfálticas caracterizadas sob compressão diametral. A Figura 3 mostra as tentativas de se estabelecer uma correlação entre um parâmetro de rigidez (MR da Figura 3a) e de fadiga (FFM MeDiNa da Figura 3b) com a área trincada simulada. Outras correlações podem ser encontradas em Nunes-Ramos (2023). Em ambos os casos, percebeu-se que esses indicadores isolados não representam bons preditores de área trincada simulada, com  $R^2$  abaixo de 0,40.

O MeDiNa prevê 4 classes para a seleção das misturas asfálticas quanto à fadiga, pelo cruzamento dos dados de MR e Fator de Fadiga das Misturas (FFM). A Figura 4a mostra que 80% das misturas do GEPPASV

são da Classe 4, ou seja, a melhor classe de fadiga. Por outro lado, a evolução da área trincada nas simulações mostrou-se bastante distinta (mais detalhes em Nunes-Ramos (2023)).

Assim, a tentativa de associação entre os indicadores do MeDiNa (MR e FFM), por meio do produto entre eles, apresentou potencial de predição da área trincada simulada para os 3 cenários, com correlações regulares principalmente para as estruturas 1 e 3 (Figura 4). Nesse sentido, misturas com maior MR\*FFM tendem a trincar menos.

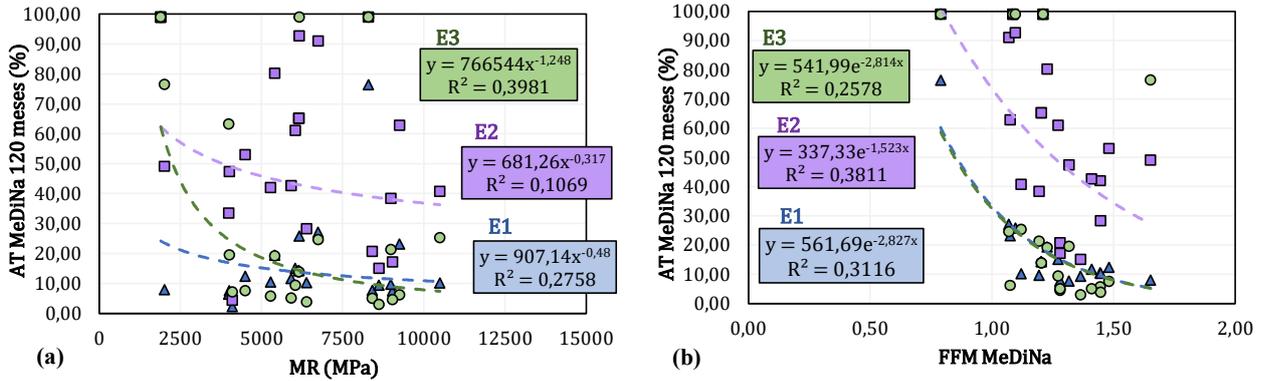


Figura 3. Correlações com AT%120meses: (a) MR e (b) FFM MeDiNa.

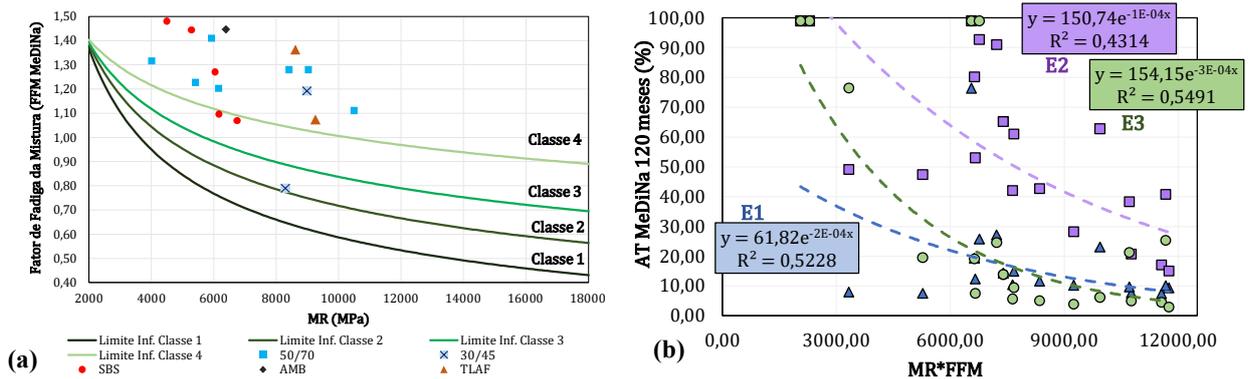


Figura 4. (a) Classes de fadiga pelo MeDiNa e (b) correlações de MR\*FFM com AT% MeDiNa

Assim, as misturas foram divididas em 3 grupos de área trincada, para identificar a faixa de variação de MR\*FFM dentro desses grupos. O indicador selecionado não segue uma distribuição normal dentro das divisões realizadas pelo teste de Shapiro-Wilk, sendo utilizada, assim, a técnica *Bootstrap* para o cálculo dos intervalos de confiança. Foram executadas 10000 reamostragens com repetição, e 95% de confiança.

A Tabela 1 mostra que, para a quantidade de dados utilizada e para os cenários simulados, o MR\*FFM não prevê o trincamento inferior a 10% (grupos 1 dos cenários 1 e 3), tendo em vista a intersecção com o intervalo de confiança do grupo 2 (AT% entre 10 e 30%). Para a segunda estrutura, não houve trincamento abaixo de 10%. Contudo, observou-se que o indicador foi eficaz para inferir se as misturas atendem ou não ao critério de trincamento de 30% do MeDiNa (valores circulosados em vermelho na Tabela 1). Portanto, as misturas devem possuir MR\*FFM acima de 7307,49 MPa sob tráfego médio, 9819,69 MPa sob tráfego pesado, e 6604,76 MPa sob tráfego extremamente pesado.

Tabela 1. Intervalos de confiança para MR\*FFM de acordo com a área trincada do MeDiNa

ESTRUTURA 1 - Tráfego médio e 5 cm de revestimento						
Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	Intervalo de confiança - IC
MR*FFM	1	8895,77	3636,40	-2775,057	2419,034	[ 6120,72 - 11314,81 ]
	2	8046,92	1524,69	-739,429	875,339	[ 7307,49 - 8922,26 ]
	3	3635,57	2527,44	-1576,236	2915,221	[ 2059,33 - 6550,79 ]
ESTRUTURA 2 - Tráfego pesado e 10 cm de revestimento						
Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	Intervalo de confiança - IC
MR*FFM	1	10827,03	1140,95	-1007,343	826,279	[ 9819,69 - 11653,31 ]
	2	6913,90	2628,25	-1258,197	1191,712	[ 5655,70 - 8105,61 ]
ESTRUTURA 3 - Tráfego extremamente pesado e 15 cm de revestimento						
Propriedade	Grupo	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior	Erro superior	Intervalo de confiança -
MR*FFM	1	9284,73	1834,87	-1165,877	1128,124	[ 8118,85 - 10412,85 ]
	2	8041,04	2286,36	-1436,275	1630,732	[ 6604,76 - 9671,77 ]
	3	4198,92	2293,69	-1790,924	1790,924	[ 2407,99 - 5989,84 ]

#### 4 CONCLUSÕES

Este estudo buscou um indicador para prever o nível de área trincada simulada no MeDiNa, com base em dados de 17 misturas asfálticas a quente do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária, da Universidade Federal de Santa Maria (GEPPASV/UFSM). Foram testadas correlações com a área trincada, simulada em 3 estruturas adequadas aos tráfegos médio, pesado e extremamente pesado.

Para as misturas do GEPPASV, as classes de fadiga propostas pelo MeDiNa não foram capazes de discretizar os materiais quanto à evolução da área trincada. No entanto, por ser imperativa a combinação entre a rigidez e a danificação por fadiga na avaliação desses materiais, verificou-se que o produto entre o módulo de resiliência e o fator de fadiga da mistura (MR\*FFM), dos ensaios por compressão diametral, foi capaz de identificar as misturas que atendem ou não ao critério de 30% de trincamento do MeDiNa. Foram encontrados, portanto, os limites mínimos para MR\*FFM de 7307,49 MPa para tráfego médio, 9819,69 MPa para tráfego pesado e 6604,76 MPa para tráfego extremamente pesado.

Por fim, é válido destacar que os pavimentos simulados são apenas uma referência. No entanto, a seleção de misturas asfálticas quanto à fadiga com base em um indicador atrelado a simulações de pavimentos aumentam a probabilidade de sucesso de projetos reais, visto que a evolução da fadiga também depende da estrutura sobre a qual o material foi aplicado.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (IPR/DNIT), pelo Termo de Execução Descentralizada nº 545/2022-00 e à ANP/Petrobras, pelo apoio financeiro à pesquisa, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. ASHTO T 322. *Standard Method of Test for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device*. EUA.
- Azevedo, P. O.; Junior, E. F. N.; Arantes, A. E. (2021) Effects of international roughness index on vehicle emissions. *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, v. 15, n. 1, p. 41–59.
- Bernucci, L. B. et al. (2022) *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. 2ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA.
- Bordin, D. T. (2020) *Implantação, acompanhamento e análise de desempenho de trechos monitorados em Santa Maria - RS*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

- Bueno, L. D. (2019) *Contribuição para a previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Cao, W.; Mohammad, L.; Barghabany, P. (2018) Use of indirect tension test and viscoelastic continuum damage theory for fatigue characterization of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 187, p. 38–49.
- Ceratti, J. A. P.; Bernucci, L. B.; Soares, J. B. (2015) *Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação*. Rio de Janeiro, RJ: ABEDA.
- Custódio, D. A. da S. (2022) *Caracterização à fadiga de misturas asfálticas por compressão diametral e comparação com os resultados do ensaio de tração-compressão*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Di Benedetto, H. et al. (2004) Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, v. 37, n. 3, p. 202–216.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1981) DNER. *Método de projeto de pavimentos flexíveis*. Rio de Janeiro/RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023) DNIT. *Manual de utilização do programa MeDiNa - versão 1.1.9*. p. 1-39.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018a) DNIT 183/2018 - ME. *Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada - Método de ensaio*. Rio de Janeiro/RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018b) DNIT 135/2018 - ME. *Pavimentação asfáltica-Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio*. Rio de Janeiro/RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018c) DNIT 136/2018 - ME. *Pavimentação asfáltica-Misturas asfálticas-Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio*. Rio de Janeiro/RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes; Diretoria de Planejamento e Pesquisa; Coordenação Geral de Planejamento e Programação de Investimentos (2014) DNIT RT-002/2014. *Catálogo de Soluções de Manutenção para Pavimentos Flexíveis*. Rio de Janeiro/RJ.
- Fritzen, M. A. (2016) *Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ.
- Guabiroba, J. V. de O. C. et al. (2023) Estudo da Fadiga e da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Produzidas em Goiás. *Matéria*, v. 28, n. 1, p. 1–21.
- Lee, J. S.; Lee, S. Y.; Le, T. H. M. (2023) Developing Performance-Based Mix Design Framework Using Asphalt Mixture Performance Tester and Mechanistic Models. *Polymers*, v. 15, n. 7, p. 1692.
- Nascimento, L. A. H. (2015) *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. PhD Thesis, North Carolina State University.
- Nunes-Ramos, V. (2023) *Proposta para seleção de ligantes e misturas asfálticas considerando deformação permanente e fadiga*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Oliveira, J. A. de O. (2019) *Avaliação do impacto da metodologia FAD-CI de seleção granulométrica na vida de fadiga de misturas asfálticas*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza.
- Papagiannakis, A. T.; Masad, E. A. (2008) *Pavement design and materials*. Hoboken: John Wiley & Sons.

- Santos, M. S. dos. (2015) *Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria - RS*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Scherer, R. G. (2018) *Estudo da influência da condição de aderência entre camadas de pavimentos em seu comportamento mecânico*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Schuster, S. L. et al. (2023) Construction quality impact in asphalt pavements cost: a framework based on air voids, linear viscoelastic and fatigue behaviour. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 24, n. 1.
- Tayebali, A. A. et al. (1994) *Fatigue response of asphalt aggregate mixtures*. Berkeley: Strategic Highway Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California.
- Underwood, B.; Baek, C.; Kim, Y. (2012) Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis. *Transportation Research Record*, n. 2296, p. 36–45.
- Vestena, P. M. (2021) *Segmentos experimentais na BR 116/RS empregando TLAflex, Hima e 55/75-E (SBS): caracterização avançada e monitoramento*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.
- Yoder, E. J.; Witczak, M. W. (1975) *Principles of pavement design*. New York (EUA): John Wiley & Sons, Inc.