

CLASSIFICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS QUANTO AO DESEMPENHO À FADIGA

Marcos Antonio Fritzen¹, Filipe Augusto Cinque de Proença Franco², Luis Alberto Herrmann Nascimento³, Laura Maria Goretti da Motta⁴ e Mariluce de Oliveira Ubaldo⁵

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Geotecnia, Av. Pedro Calmon s/n, 21941-596, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil

email: marcosantonio_ufrj@yahoo.com.br

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Geotecnia, Av. Pedro Calmon s/n, 21941-596, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil

³Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES), Av. Horácio Macedo, 950, 21941-915 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil

⁴Universidade Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Geotecnia, Av. Pedro Calmon s/n, 21941-596, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil

⁵Universidade Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Geotecnia, Av. Pedro Calmon s/n, 21941-596, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil

Sumário

Um dos desafios no dimensionamento mecânico empírico de pavimentos asfálticos é como controlar a qualidade da mistura asfáltica aplicada no campo com relação à definida em projeto. É comum não serem conhecidos os materiais e tipos de asfaltos que serão executados no campo durante a fase de projeto, e que somente serão estudados ao longo da execução da obra. O objetivo do trabalho é propor uma metodologia que permita elaborar projetos mecânicos empíricos pelo programa MeDiNa com base em uma classificação das misturas asfálticas em termos de desempenho à fadiga, associado ao Módulo de Resiliência. Esta classificação define o conceito de Fator de Fadiga de Misturas Asfálticas que, em conjunto com o Módulo de Resiliência, dividem as misturas asfálticas em quatro Classes de Fadiga. Estas Classes de Fadiga possuem propriedades de projeto que, quando superadas pelas misturas de campo, garantem o desempenho à fadiga do pavimento construído.

Palavras-chave: Fadiga por Compressão Diametral; Método de Dimensionamento Nacional Brasileiro – MeDiNa; Desempenho de Misturas Asfálticas – Fadiga.

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento adequado de um pavimento asfáltico visa assegurar que a repetição da passagem dos eixos dos veículos não irá causar o trincamento excessivo da camada de revestimento por fadiga dentro do período de vida do projeto e, também, garantir que as espessuras das camadas de sua estrutura, bem como suas características, sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda (acúmulo excessivo de deformação permanente), considerando a compatibilidade entre as deformabilidades dos materiais [1].

Diversos fatores incidem sobre os danos nas estruturas dos pavimentos tais como: o volume e velocidade do tráfego, o peso e pressão das rodas do carregamento, a variação lateral da passagem dos veículos, o efeito do clima, em especial da temperatura e da umidade, e, principalmente, as propriedades mecânicas dos materiais que serão aplicados. Inicialmente, o projetista não possui o conhecimento exato destes fatores e, na verdade, elabora o dimensionamento especificando os parâmetros médios ou característicos de materiais disponíveis na região, com um grau de risco estatístico adotado como aceitável. O projeto, então, condiciona a etapa de execução à seleção e caracterização dos materiais no campo de modo a atender às premissas adotadas no dimensionamento.

Nos métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento de pavimentos, a caracterização dos materiais de pavimentação é feita de uma forma diferente daquelas utilizadas nos métodos tradicionais. Segundo [2], nos métodos empíricos os materiais são caracterizados por índices de qualidade associados indiretamente ao seu desempenho e condições de construção.

Em relação às misturas asfálticas, é preciso conhecer o comportamento mecânico quanto à deformabilidade, ou seja, conhecer o módulo de deformabilidade e o coeficiente de Poisson [3].

Muitos métodos de dimensionamento, até o momento atual, mesmo com a introdução de modelos constitutivos viscoelásticos na análise de pavimentos, fazem aproximações desse comportamento fixando condições ambientais e de carregamento instantâneas de forma que, para uma dada temperatura e uma dada frequência, o comportamento dos materiais asfálticos seja considerado elástico linear. Dos diversos métodos laboratoriais para a obtenção da relação constitutiva entre tensão x deformação específica elástica, destaca-se, conforme [3], o método de determinação do módulo de resiliência por compressão diametral ou de tração indireta (MR), o mais empregado no Brasil.

Além de caracterizar as misturas asfálticas em relação ao módulo de resiliência, o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), requer o conhecimento do comportamento da mistura em relação à fadiga, obtida pelo ensaio por compressão diametral. O modelo matemático utilizado é o apresentado na expressão a seguir, cujas constantes k_1 e k_2 são obtidas por regressão estatística dos resultados do ensaio.

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

Onde N é a vida de fadiga em laboratório;

ε_t é a deformação específica de tração; e

k_1 e k_2 são constantes de regressão.

Conforme descreve [3], uma das dificuldades para o projeto é que, em geral, não se conhecem ainda as características das misturas que serão utilizadas nos trechos e, em função disso, não se consegue realizar os ensaios nas condições reais para a determinação das características mecânicas.

Durante a fase de projeto, em algumas situações, a escolha dos materiais a serem aplicados fica dependente de fatores que o projetista não possui o controle, principalmente em relação às misturas asfálticas. Durante a obra, fornecedores de ligante asfáltico podem ser diferentes, uma outra pedreira ou veio da rocha podem introduzir variáveis, o tipo de usina utilizada pelo empreiteiro pode alterar, e todos estes fatores, quando diferentes das previstas na mistura de projeto, alteram o comportamento da estrutura.

Avaliar, portanto, se a mistura asfáltica aplicada no campo irá atender aos requisitos exigidos no projeto do dimensionamento do pavimento é uma das questões que o programa MeDiNa precisa contornar. Assim, este trabalho tem como objetivo propor uma classificação de misturas asfálticas em termos de desempenho à fadiga, associada ao Módulo de Resiliência, que permite o projetista escolher Classes de misturas asfálticas, cujas propriedades, quando superadas pelas misturas de campo, garantem o desempenho à fadiga do pavimento construído conforme projetado.

Para esta classificação, foi utilizado o conceito de desempenho baseado na curva de fadiga: o Fator de Fadiga de Misturas Asfálticas (FFM). Este conceito foi introduzido por [4] para ranquear as misturas asfálticas quanto ao seu desempenho, considerando apenas as curvas de fadiga. O FFM foi definido pelos autores a partir da área da curva de fadiga obtida a 20°C, no espaço log-log entre as deformações de 100 e 200 microstrains, valores foram escolhidos por serem comumente encontrados nas misturas quando em serviço.

O FFM foi utilizado neste trabalho de forma que, em conjunto com o Módulo de Resiliência (MR), permitir classificar as misturas asfálticas em quatro Classes de Fadiga.

Os dados utilizados nas análises foram obtidos de ensaios de fadiga de misturas asfálticas pelo método de compressão diametral de diversas pesquisas tecnológicas realizadas no Brasil e da base de dados do laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

2 DADOS PARA PESQUISA

Para compor o banco de dados deste trabalho, foram levantados os resultados de ensaios de carga repetida à tensão controlada na temperatura de 25°C realizados no laboratório de pavimentação da COPPE/UFRJ e de diversos outros autores. Foram analisados 105 resultados de ensaios de fadiga, de diversas amostras de corpos-de-prova de misturas asfálticas, envolvendo misturas asfálticas com ligantes tradicionais; misturas com ligantes modificados por polímero; e misturas com asfalto borracha.

Estão incluídos nas regressões os dados dos ensaios realizados por [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], além de outros ensaios realizados no laboratório de geotecnia Jacques de Medina, setor de pavimentação, na COPPE/UFRJ.

Todas as 105 curvas de fadiga foram plotadas no gráfico da Figura 1 a seguir. Os dados demonstraram uma grande variabilidade do comportamento das misturas asfálticas em relação ao comportamento à fadiga. O que deixa clara a importância desta propriedade no dimensionamento dos pavimentos. Qualquer variação da mistura em relação às propriedades utilizadas no projeto pode ser suficiente para a ruptura precoce do pavimento.

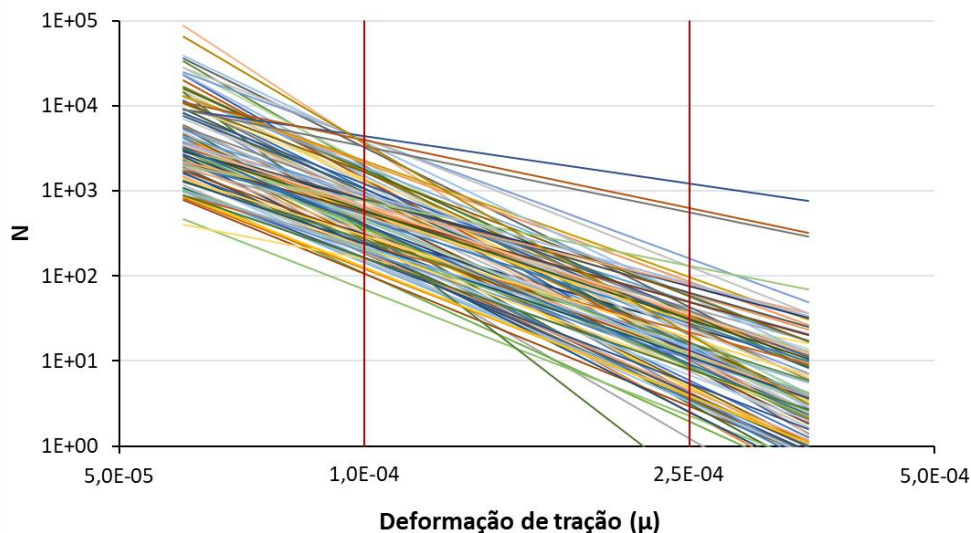


Fig. 1 – Curvas de fadiga de 105 amostras de misturas asfálticas

3 FATOR DE FADIGA DA MISTURA (FFM)

Um dos requisitos do dimensionamento de pavimentos é que no campo a mistura asfáltica a ser aplicada possua, além do módulo de resiliência de projeto, um comportamento à fadiga melhor ou pelo menos igual à mistura selecionada no projeto. A curva de fadiga é definida por dois parâmetros de regressão k_1 e k_2 . Comparar as misturas observando-se apenas estas duas constantes de forma analítica é uma tarefa complexa. O auxílio do gráfico é fundamental, pois as misturas podem apresentar diversos comportamentos e inclinações.

Considerando-se uma estrutura de pavimento típica brasileira, constituída por um subleito compactado, com camadas de sub-base e base granulares, e uma camada de revestimento asfáltico, as deformações de tração características que ocorrem no interior do revestimento asfáltico dependem das espessuras, dos módulos de deformabilidade das camadas e das cargas. Contudo, espera-se uma variação típica entre os valores de 100μ e 250μ . Para pavimentos com camadas de base mais rígidas ou estabilizadas, as deformações de tração ficam abaixo de 100μ , podendo até não haver tração.

O Quadro 1 a seguir apresenta os resultados de deformação de tração de diversas simulações no programa de análise elástica de múltiplas camadas para o cálculo de tensões e deformações no pavimento (AEMC) de [1] de uma estrutura com base granular, variando-se apenas os módulos de resiliência da camada de revestimento. A

estrutura é composta por um subleito de 125 MPa, uma sub-base de 20 cm e 250 MPa, uma base granular de 20 cm e 400 MPa e um revestimento com 10 cm.

Quadro 1 – Valores de deformação de tração em uma estrutura de pavimento com base granular

Módulo de Resiliência (MPa) do revestimento	5000	6000	7000	8000	9000	10000	12000
Deformação de tração (μ) na fibra inferior	224	203	187	173	161	151	135

As misturas que possuem maiores módulo de resiliência, trabalham com deformações de tração menores, o que poderia sugerir uma melhor resistência à fadiga. Mas é possível que existam misturas que, mesmo com módulos de resiliência mais baixos, e mesmo trabalhando em níveis maiores de deformação de tração, podem ter um comportamento melhor à fadiga. Ou seja, para avaliar a qualidade da mistura é preciso correlacionar o módulo de resiliência com a curva de fadiga, de um modo tal que se permita verificar se ela irá atender ao requerido no projeto.

Do gráfico da Figura 1 verifica-se que o segmento entre 100 μ e 250 μ das curvas de fadiga na escala log-log é linear. Como as inclinações são variáveis, é possível fazer a comparação entre elas de forma analítica com base apenas na área do trapézio formado pelas retas. Esta área foi definida como o Fator de Fadiga da Mistura (FFM), apresentada na Figura 2 e que é calculada pela expressão a seguir:

$$FFM = 0,2 \cdot [\log(N_{100}) + \log(N_{250})] \quad (2)$$

Onde o FFM é o Fator de Fadiga da Mistura;

$$N_{100} = k_1 \cdot 100\mu^{k_2} \text{ (Número de aplicações de carga para a deformação específica de } 100\mu\text{);}$$

$$N_{250} = k_1 \cdot 250\mu^{k_2} \text{ (Número de aplicações de carga para a deformação específica de } 250\mu\text{);}$$

k_1 e k_2 são as constantes de regressão da curva de fadiga.

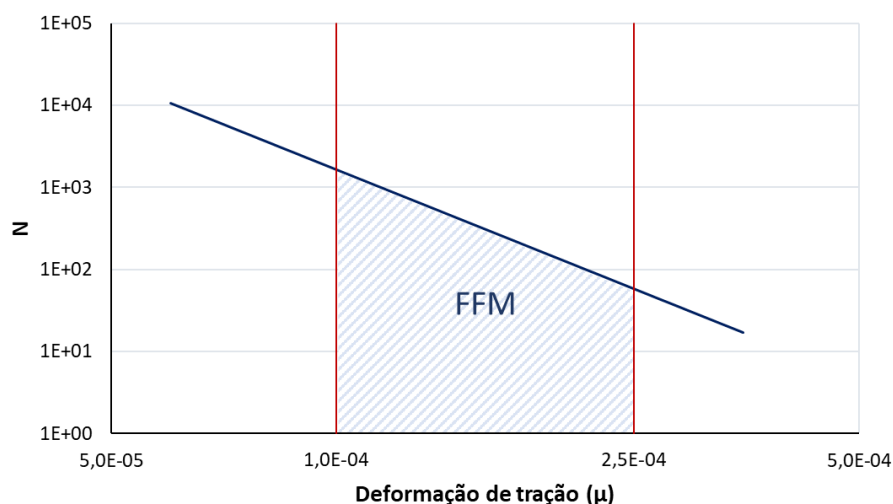


Fig. 2 – Fator de Fadiga da Mistura (FFM)

O limite superior da deformação específica utilizado no cálculo do FFM foi alterado de 200 μ para 250 μ em relação ao conceito definido originalmente em [4], para se ajustar ao ensaio que define a curva de fadiga. O trabalho citado utiliza o ensaio de tração direta e é realizado a 20°C enquanto o ensaio requerido pelo programa MeDiNa é o de compressão diametral, realizado a 25°C, com o qual foi calibrado.

O FFM, portanto, permite comparar misturas diferentes em relação à fadiga: Misturas com valores maiores de FFM e módulo de resiliência tenderão a melhores comportamentos à fadiga em pavimentos flexíveis típicos brasileiros. Para bases estabilizadas ou com módulo elevado, as deformações de tração fogem do intervalo de cálculo do FFM (de 100 μ a 250 μ).

4 CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS EM RELAÇÃO AO DESEMPENHO À FADIGA

Apenas o Fator de Fadiga da Mistura não é suficiente para indicar se uma mistura asfáltica irá atender aos requisitos definidos em projeto. O módulo de resiliência também influencia no comportamento do pavimento, alterando o nível de deformação de tração na camada e, por consequência, a vida de fadiga do material.

Cada mistura asfáltica possui propriedades particulares de módulo de resiliência e de resistência a fadiga e os dois estão inter-relacionados com o desempenho do pavimento. Com base nos resultados dos 105 ensaios de fadiga por compressão diametral, aplicando o conceito do Fator de Fadiga da Mistura e com o módulo de resiliência das amostras, foi desenhado o gráfico apresentado na Figura 3, relacionando o FFM com o MR.

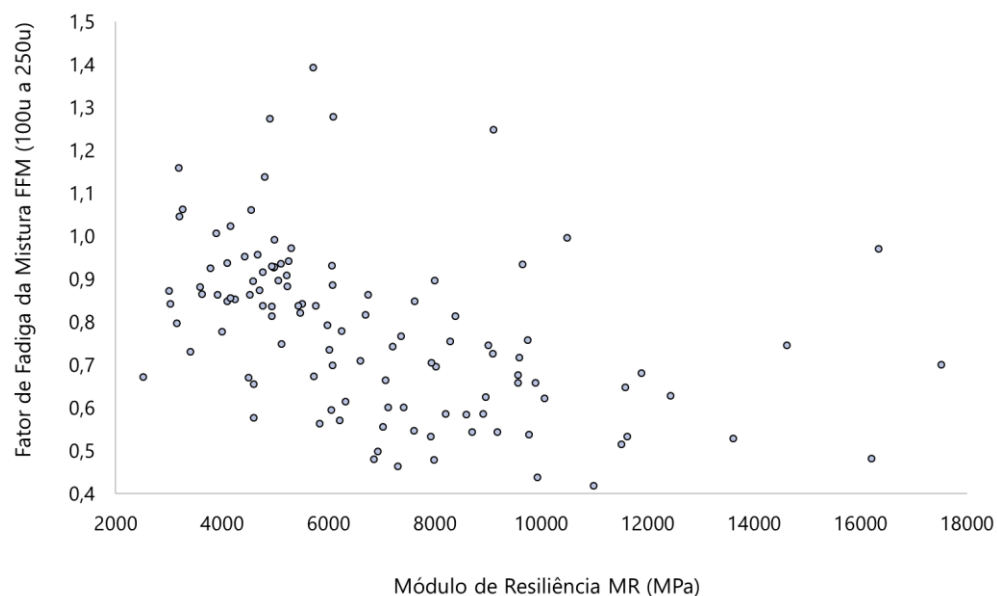


Fig. 3 – Relação entre FFM e MR

Do gráfico da Figura 3 pode-se observar uma tendência que na medida em que o MR aumenta, o FFM diminui. Mas não é possível se obter uma boa correlação entre as duas variáveis, sem aplicar qualquer filtro.

O filtro que apresentou os melhores resultados para a classificação das misturas asfálticas foi obtido a partir da análise de cada mistura em termos de desempenho à fadiga em serviço. Esta análise foi realizada pelo programa MeDiNa, por meio da função “Avaliar a Estrutura”, que produz como um dos resultados, a evolução da área trincada com a passagem do tráfego.

Assim, para uma estrutura típica de pavimento, a mesma utilizada para ilustrar o Quadro 1, alterando apenas o MR e os coeficientes k_1 e k_2 da curva de fadiga da camada de revestimento, os 105 materiais foram analisados. O resultado obtido foi o número de repetições do eixo padrão (N30) que o pavimento suportaria até atingir 30% de

área trincada, com 85% de confiabilidade. O valor de 30% de área trincada foi o utilizado na calibração do programa MeDiNa [18], a partir de dados de trechos monitorados de pavimentos de rodovias e vias brasileiras, como critério limite para o dimensionamento de pavimentos asfálticos.

Com a listagem completa, MR x FFM x N30, os resultados foram filtrados dentro de faixas de número de repetições do eixo padrão. Para cada uma destas faixas, foi obtida a correlação estatística e a curva de regressão entre os valores de MR e FFM. Os resultados da aplicação do filtro revelaram correlações altas entre as variáveis MR x FFM, conforme detalhado no Quadro 2.

Quadro 2 – Correlações estatísticas entre MR x FFM conforme as faixas de número de repetições do eixo padrão para 30% de área trincada

Faixa	Intervalo	Regressão	R ²
0	$N \leq 4,5 \cdot 10^6$	-	-
1	$4,5 \cdot 10^6 < N \leq 6,0 \cdot 10^6$	$FFM = 74,58 \cdot MR^{-0,526}$	0,83
2	$6,0 \cdot 10^6 < N \leq 7,5 \cdot 10^6$	$FFM = 31,31 \cdot MR^{-0,410}$	0,95
3	$7,5 \cdot 10^6 < N \leq 1,0 \cdot 10^7$	$FFM = 15,37 \cdot MR^{-0,316}$	0,93
4	$N > 1,0 \cdot 10^7$	$FFM = 6,77 \cdot MR^{-0,207}$	0,67

As equações de regressão das faixas foram, portanto, utilizadas para separar as misturas asfálticas em classes de fadiga. Sendo que, as misturas que ficaram classificadas na Classe 0 não são indicadas para aplicação em rodovias, pois para uma estrutura típica com 10 cm de espessura de revestimento não conseguiram atender um tráfego de $4,5 \times 10^6$. Portanto, a Classe 0 não é considerada no programa de dimensionamento MeDiNa. A classificação final está apresentada no gráfico a seguir.

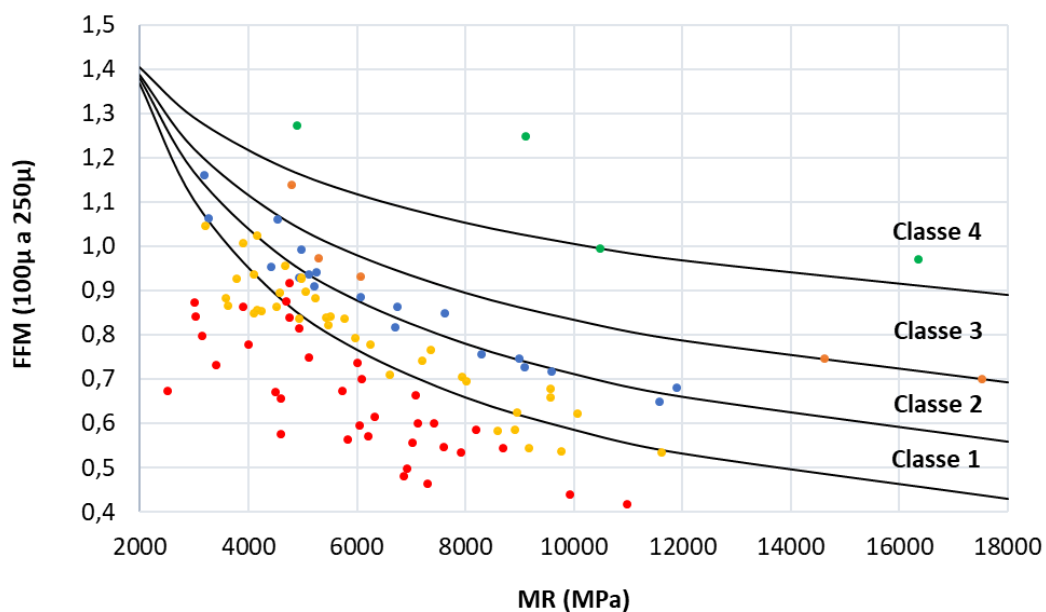


Fig. 4 – Classificação das misturas asfálticas em relação ao desempenho à fadiga

As curvas apresentadas no gráfico da Figura 4 servem apenas para separar os materiais em grupos, independentemente da quantidade de pontos utilizada na regressão. A grande maioria dos pontos se enquadra nas Classes 0, 1 e 2, pois foram projetadas por métodos que não focam no desempenho das misturas à fadiga. As Classes 3 e 4 já são mais difíceis de serem obtidas, pois requerem um desempenho superior que é conseguido apenas com um bom projeto de mistura asfáltica e, principalmente, com a aplicação de modificadores no ligante betuminoso.

É importante ressaltar que os dados são referentes a diversos tipos de misturas (misturas tradicionais, misturas com asfalto modificado e misturas com asfalto borracha). A utilização de modificadores no asfalto permitiu a obtenção de misturas com bons resultados à fadiga. Por exemplo, 50% das misturas com asfalto modificado se enquadraram nas Classes 3 e 4, e uma mistura apenas não conseguiu classificar. Quanto às misturas elaboradas com ligantes não modificados, a maioria, 54%, se concentrou nas Classes 1 e 2, 33% ficou inferior a Classe 1 e apenas 13% nas Classes 3 e 4.

5 APLICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO

Para verificar se a classificação proposta é consistente, foi realizado um dimensionamento com o programa MeDiNa para uma mistura asfáltica Classe 3 de referência. Após o dimensionamento, a estrutura foi verificada com a substituição dos dados de MR e coeficientes de regressão de novas misturas asfálticas, sendo duas misturas para cada Classe de Fadiga.

A ideia é que o projeto defina apenas a Classe da mistura asfáltica e quando for executar a camada asfáltica na obra, o construtor estude um traço de uma mistura em laboratório capaz de atender ou até superar a Classe da mistura requerida no projeto.

Para a análise de razoabilidade da classificação proposta utilizou-se a seguinte estrutura: Subleito com MR igual a 189 MPa; uma camada de sub-base de solo laterítico com MR igual a 250 MPa e 20 cm de espessura; uma camada de base granular com 15 cm de espessura e MR igual a 350 MPa.

Para a mistura asfáltica de referência Classe 3 do programa MeDiNa, a espessura dimensionada do revestimento ficou igual a 9,3 cm, com 30% de área trincada no final de 10 anos, e um tráfego de $7,0 \times 10^6$ repetições do eixo padrão.

O Quadro 3 e A Figura 5 a seguir apresentam a verificação, utilizando o programa MeDiNa, do percentual de área trincada da mesma estrutura, variando-se apenas a classificação da mistura asfáltica. As misturas utilizadas na verificação foram diferentes das 105 utilizadas para a obtenção das regressões e da definição das Classes.

Quadro 3 – Verificação do dimensionamento utilizando misturas asfálticas diferentes da de projeto

Mistura	Fonte	MR	k1	k2	FFM	Classe	% AT
1	*	13607	1,89e-12	-3,433	0,53	1	49,8%
2	[19]	12427	2,24e-13	-3,744	0,63	1	39,2%
3	[20]	9748	2,3e-08	-2,51	0,76	2	36,6%
4	*	8389	3,98e-11	-3,27	0,81	2	35,8%
Referência	----	8000	1,00e-12	-3,75	0,90	3	30,0%
5	[21]	14614	2,73e-10	-3,01	0,75	3	24,3%
6	[22]	9649	2,90e-8	-2,60	0,93	3	21,2%
7	*	6088	9,28e-11	-3,49	1,28	4	11,8%
8	*	5708	7,40e-03	-1,48	1,39	4	4,7%

* Banco de dados do laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ

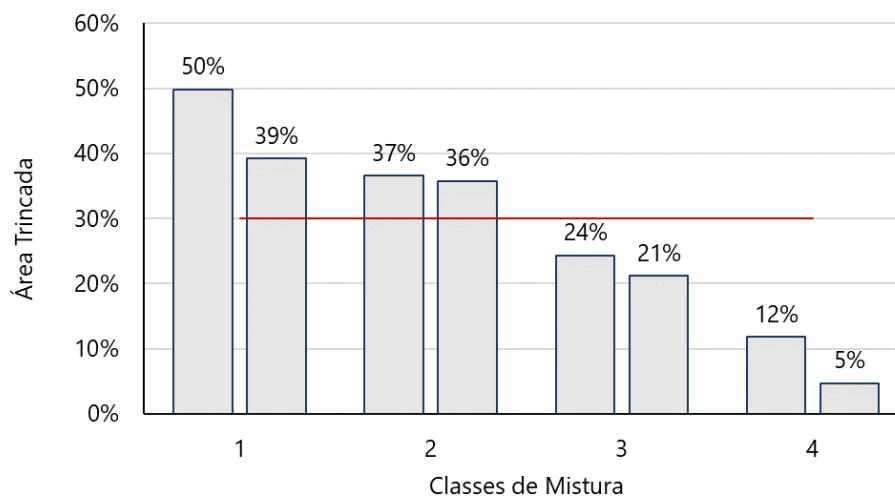


Fig. 5 – Verificação do dimensionamento utilizando misturas asfálticas de diferentes classes

Os dados apresentados na Figura 5 permitem confirmar que, uma vez definida a Classe da Mistura Asfáltica no projeto, qualquer mistura que atenda a classificação ou a supere, atenderá aos requisitos do dimensionamento em relação à fadiga.

Usando o sistema de classificação de misturas ora proposto, o projeto e a execução terão uma ligação bastante objetiva que facilitará tanto a fase inicial do projeto quanto a execução, permitindo que se trabalhe com faixas de propriedades, ao mesmo tempo garantindo a adequação da solução adotada de maneira racional.

Esta formulação é similar ao que hoje é feito em pavimentos de concreto, em que o concreto cimento é especificado pelo projeto em termos de resistência à compressão e à tração na flexão.

Importante ressaltar novamente que essa avaliação serve apenas para estruturas de pavimento flexíveis, onde as deformações de tração na camada do revestimento variam de 100μ a 250μ .

6 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou as propriedades mecânicas e a previsão do desempenho em serviço de 105 misturas asfálticas, de forma a classificá-las em relação à fadiga. A avaliação revelou uma variabilidade elevada do desempenho dos materiais que mostra a importância das etapas de seleção dos materiais e dosagem, as quais devem ser sucedidas por controles de execução que garantam os requisitos de qualidade especificados para as misturas.

Para buscar uma forma classificar as misturas asfálticas em termos de desempenho à fadiga, foi utilizado o Fator de Fadiga da Mistura (FFM), que é a área da curva de fadiga no segmento compreendido entre 100μ e 250μ de deformação de tração na escala log-log. O FFM permite fazer a comparação do desempenho à fadiga entre diversas misturas asfálticas, considerando uma estrutura de pavimento flexível.

O FFM e o MR mostraram-se adequados para classificar as misturas asfálticas quanto à fadiga, pois levam em conta a resistência do material e sua contribuição estrutural. Os resultados mostram que há faixas com diferentes classes de misturas quando se considera estas propriedades em conjunto, o que permite não apenas a especificação racional de misturas para projeto M-E de pavimentos flexíveis, como também pode nortear a dosagem das misturas asfálticas, incluindo a seleção dos agregados, da granulometria e do tipo de ligante asfáltico.

Quatro Classes de Misturas foram definidas em termos de desempenho à fadiga, sendo as melhores aquelas que se enquadraram na Classe 4; e, do contrário, as misturas de Classe 1 ou inferiores são aquelas de menor durabilidade.

Com base nesta proposta de classificação, o programa MeDiNa passa a requerer um novo parâmetro técnico que irá contribuir para o sucesso do projeto. Ao ser definida pelo projetista, a Classe de Fadiga da mistura de projeto deverá ser atendida na fase de construção, o que deverá ser controlado pelos agentes fiscalizadores.

Além disso, as Classes de Fadiga auxiliam o projetista quando não é possível se conhecer as características das misturas que serão utilizadas nos trechos. Com a utilização das misturas de referência de cada classe, o projetista poderá escolher qualquer uma delas em uma formulação similar ao que hoje é feito em pavimentos de concreto, em que o concreto cimento é especificado pelo projeto em termos de resistência à compressão e à tração na flexão.

O uso de classes de misturas permitirá uma dinâmica adequada à fase de projeto, sendo uma maneira prática de especificar misturas asfálticas para pavimentos. Embora não tratado neste trabalho, o desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas também é considerado por classes no MeDiNa, as quais foram desenvolvidas com base no ensaio uniaxial para determinação do Flow Number.

7 REFERÊNCIAS

1. F. A. C. P. Franco, *Método de Dimensionamento Mecânico Empírico de Pavimentos Asfálticos*. Tese D.Sc., Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
2. L. M. G. Motta, *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.
3. L. M. G. Motta; J. Medina; A. M. Sousa. Características de fadiga e resiliência de concretos asfálticos brasileiros. *Proc: Anais do 16º Encontro de Asfalto*, 2002, IBP, Rio de Janeiro.
4. L. A. H. Nascimento; S. M. N. Rocha; C. E. H. Nascimento; Y. R. Kim; M. Chacur; A. T. Martins. Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras. *Proc. 21º Encontro de Asfalto*, 2014, IBP, Rio de Janeiro.
5. S. Pinto. *Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.
6. S. A. S. Benevides. *Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos: empírico do DNER e da resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do estado do Ceará*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.
7. C. R. Ramos; V. L. E. S. Tizo Lao; H. Farah; F. L. Agodi. Avaliação do desempenho do asfalto de alto índice a nível de laboratório e de campo, *Proc. 15º Encontro de Asfalto*, 2000, IBP, Rio de Janeiro.
8. R. B. Salini. *Utilização de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UFSC, Santa Catarina, Brasil, 2000.
9. J. B. Soares; L. M. G. Motta; J. A. Paiva; J. V. C. Branco. Propriedades mecânicas de misturas asfálticas preparadas com vários ligantes e granulometrias, *Proc. 15º Encontro de Asfalto*, 2000, IBP, Rio de Janeiro.
10. G. L. O. Marques; L. M. G. Motta; L. F. M. Leite; R. S. Constantino. Exemplos de dosagem SUPERPAVE no Brasil, *Proc. 33ª Reunião Anual de Pavimentação*, 2001, ABPv, Florianópolis.
11. S. A. Dantas Neto; M. M. Farias; L. F. M. Leite; C. C. Santos. Estudo da influência do tipo de ligante nas características mecânicas das misturas asfálticas, *Proc. 33ª Reunião Anual de Pavimentação*, 2001, ABPv, Florianópolis.
12. M. A. Fritzen. *Avaliação de soluções de reforço de pavimento asfáltico com simulador de tráfego na rodovia Rio - Teresópolis*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
13. S. Magalhães. *Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
14. H. B. Freitas. *Misturas asfálticas de módulo elevado com uso de escória de aciaria como agregado*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

15. L. S. Cavalcanti. *Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
16. L. D. Bueno. *Avaliação Deflectométrica e de Rigidez: Estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil, 2016.
17. J. Budny, *Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
18. M. A. Fritzen. *Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
19. A. G. Pazos. *Efeitos de Propriedades Morfológicas de Agregados no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
20. R. Z. Fengler. *Caracterização de ligantes e misturas asfálticas modificados com a adição de Trinidad Lake Asphalt*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
21. C. S. D. Flora. *Comportamento mecânico de duas misturas asfálticas com o uso de um aditivo surfactante de mistura morna*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
22. M. Zubarán, *Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.