



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

COMPARAÇÃO DO PARÂMETRO FATOR DE FADIGA DA MISTURA (FFM) OBTIDO POR DIFERENTES ENSAIOS

Lucas Aragão Lira¹; Arthur Moreira Veras¹; Iuri Sidney Bessa¹; Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos¹; Jucline Batista dos Santos Bastos²; Beatriz Chagas Silva Gouveia³ & Jorge Barbosa Soares¹

RESUMO

O trincamento por fadiga é uma das principais causas de defeitos ao pavimento asfáltico, principalmente em idades mais avançadas de sua vida útil. A resistência à fadiga é estudada por meio de diversos ensaios, nos quais destacam-se o ensaio de Fadiga por Compressão Diametral (CD), normatizado no Brasil (DNIT 183/2018) e responsável pelos coeficientes de regressão (k_1 e k_2) no Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), e o ensaio de Fadiga por Tração-Compressão (T-C) (AASHTO TP107), de maior complexidade e mais representativo do fenômeno estudado. Buscando comparar os resultados de ambos os ensaios e uma correlação entre o seus Fatores de Fadiga da Mistura (FFM), índice de desempenho da mistura quanto a resistência à fadiga, comparou-se o resultado dos dois métodos em quatro misturas, com diferentes tipos de ligantes e agregados de diferentes tamanhos e origens. A representação das curvas de Wöhler mostrou comportamento semelhante em ambos os ensaios quando foi levado em consideração uma mesma temperatura na construção de ambas (25°C). Embora os FFMs obtidos através do ensaio T-C sejam significativamente maiores, obteve-se uma boa correlação dos índices ($R^2 > 0,98$) quando representados por função de potência. Devido ao baixo número de pontos, no entanto, é preciso uma amostragem maior para verificar uma tendência de comportamento.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga por Compressão Diametral, Fadiga por Tração-Compressão, Fator de Fadiga da Mistura.

ABSTRACT

Fatigue cracking is one of the main distresses in asphalt pavements, especially at more advanced ages of its useful life. Fatigue resistance is studied by means of various tests, among which the Diametral Compression Fatigue (CD) test, standardized in Brazil (DNIT 183/2018) and responsible for the regression coefficients (k_1 and k_2) in the Brazilian National Design Method (MeDiNa), and the Tension-Compression Fatigue (T-C) test (AASHTO TP107), of greater complexity and more representative of the studied phenomenon. Seeking to compare the results of both tests and a correlation between their Fatigue Area Factors (FAF), an index of the mixture's performance in terms of fatigue resistance, the results of the two methods were compared in four mixtures, with different types of binders and aggregates of different sizes and origins. The representation of Wöhler curves presented similar behavior in both tests when the same temperature was considered (25°C). Although the FFMs obtained through the T-C test were significantly higher, a good correlation was achieved ($R^2 > 0.98$) when represented by a power function. Due to the low number of data points, however, a larger sample is needed to verify a behavioral trend.

KEY WORDS: Diametral Compression Fatigue Test, Tension-Compression Fatigue Test, Fatigue Area Factor.

¹ Universidade Federal do Ceará, lucaslira@alu.ufc.br; arthurveas@alu.ufc.br; iuri@det.ufc.br; abadopulos@ufc.br; jsoares@det.ufc.br

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, jucline.santos@ifce.edu.br

³ Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, beatriz.gouveia@dnit.gov.br



INTRODUÇÃO

O trincamento por fadiga em pavimentos asfálticos, uma questão crítica causada pela repetição de cargas de tráfego (ASTM, 1979), propicia a propagação de fissuras que comprometem a integridade estrutural do pavimento e sua resistência aos esforços aplicados, resultando em perda de material e exposição das camadas subjacentes. Esse tipo de trincamento tem alta incidência nas rodovias nacionais, comprometendo tanto as características funcionais quanto as estruturais das rodovias em todo o país. Assim, a previsão da evolução desses trincamentos pode orientar decisões preventivas e otimizar o dimensionamento das camadas do pavimento asfáltico.

O método de dimensionamento lançado pelo DNIT (MeDiNa) introduz diretrizes atualizadas para a pavimentação no Brasil, substituindo o empirismo do método tradicional (SOUZA, 1981) por uma abordagem mais mecanicista. O MeDiNa inclui ensaios de caracterização de rigidez, como o Módulo de Resiliência (DNIT 135/2018-ME), e vida de fadiga, como o ensaio de Compressão Diametral (DNIT 183/2018-ME). Eles são usados para determinar a rigidez e a vida de fadiga dos materiais, respectivamente, mas não levam em conta variáveis viscoelásticas que trazem temperatura e frequência, sabidamente com efeito relevante no processo (PAPER NOSSO NA TRANSPORTES). Apesar dessas limitações, os métodos foram incorporados na proposta de atualização do método de dimensionamento para análises estruturais e previsões de fadiga, representando avanços práticos para a infraestrutura rodoviária nacional (VASCONCELOS, 2020).

Concentrando-se na estimativa do comportamento da mistura asfáltica perante a fadiga para auxiliar a sua dosagem, o Fator de Fadiga da Mistura (FFM) foi escolhido como variável de saída por ser um parâmetro que permite avaliar o comportamento à fadiga e categorizar o desempenho das misturas em um gráfico, em que também se considera a sua rigidez.

Fritzen et al. (2019) desenvolveram uma metodologia para a classificação de misturas asfálticas em quatro categorias com base no desempenho de fadiga. A metodologia requer a determinação da curva de Wöhler, que relaciona o número de ciclos (N) à deformação de tração inicial (ϵ_i). Com base na regressão dessa curva, é possível calcular o FFM, conforme a Equação 1. Posteriormente, são estabelecidas correlações entre o MR e o FFM para identificar em qual categoria a mistura asfáltica se enquadra. A Figura 1 ilustra a regressão aplicada para determinar as classes com um número de repetições padrão de 30% de área trincada. A metodologia apresentada foi incorporada ao *software* MeDiNa.

$$\text{FFM (CD)} = 0,2 \times [\log(N_{100}) + \log(N_{250})] \quad (1)$$

Onde: FFM (CD) é o Fator de Fadiga da Mistura para o ensaio de fadiga por Compressão Diametral (CD); N_{100} é o número de ciclos correspondente à deformação específica de $100 \mu\epsilon$; N_{250} é o número de ciclos corresponde à deformação específica de $250 \mu\epsilon$.

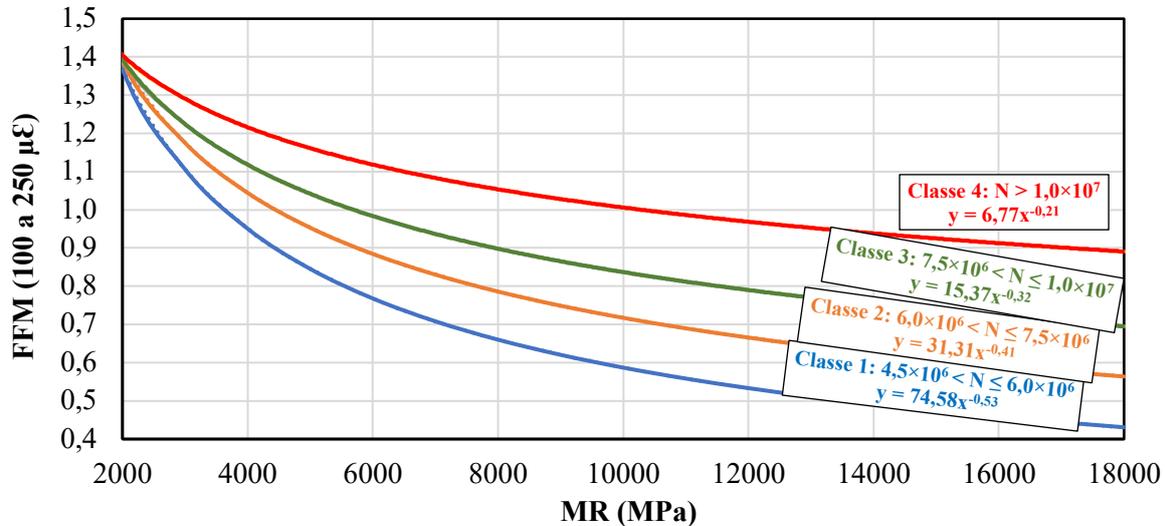


Figura 1. Classificação quanto à fadiga de misturas asfálticas (adaptada de Fritzen *et al.*, 2019)

Diversas abordagens de modelagem, incluindo modelos empíricos de fadiga, modelos de fratura, modelos de dano contínuo viscoelástico ou *viscoelastic continuum damage* (VECD) e modelos simplificados de VECD, como o *simplified viscoelastic continuum damage* (S-VECD) (UNDERWOOD *et al.*, 2006; ROQUE *et al.*, 2010; GUDIPUDI; UNDERWOOD, 2016; SILVA *et al.*, 2024; LUCAS JUNIOR, 2018), têm sido exploradas para prever a fadiga de pavimentos.

A teoria VECD é fundamentada em três conceitos principais: mecânica do dano contínuo, princípio da correspondência elástico-viscoelástico e princípio da superposição tempo-temperatura com crescimento do dano. A mecânica do dano contínuo se baseia na teoria do potencial de trabalho para modelar os efeitos de microfissuras por meio de variáveis de estado internas, permitindo que o material seja considerado como um corpo contínuo e homogêneo. O princípio de correspondência elástico-viscoelástico é baseado no conceito de pseudo-deformação, que permite a redução do comportamento viscoelástico do material ao correspondente comportamento elástico. Já o princípio de superposição tempo-temperatura com crescimento do dano considera os efeitos combinados de tempo/taxa e temperatura, mesmo fora do domínio viscoelástico do comportamento do material (SAFAEI *et al.*, 2016).

O modelo S-VECD caracteriza o desempenho por fadiga de uma mistura asfáltica com base nos resultados de ensaios de fadiga e módulo dinâmico ($|E^*|$). Sua capacidade preditiva, diferencia-o de abordagens convencionais de modelagem de fadiga, em que os parâmetros individuais são definidos empiricamente. Além disso, as propriedades do modelo S-VECD derivadas de ensaios laboratoriais podem ser usadas diretamente como dados de entrada para simulações de desempenho de pavimentos, utilizando programas que permitem prever a área trincada, como CAP3D-D e FlexPAVE (SANTIAGO *et al.*, 2018; ZENG *et al.*, 2023).

Um dos ensaios mais usados para a caracterização da fadiga e aplicação dos modelos é o uniaxial cíclico de tração-compressão (NASCIMENTO, 2014; BABADOPULOS *et al.*, 2015; BOEIRA *et al.*, 2018). Nesse ensaio, há a aplicação de uma carga senoidal de amplitude constante em corpos de



prova cilíndricos até que a amostra entre em ruptura. Durante o ensaio, são coletados dados de deformação, carga, ângulo de fase e módulo dinâmico. Com este ensaio, diferentes abordagens podem ser aplicadas para a análise da resistência à fadiga, sendo possível obter uma curva característica que relaciona a evolução do dano (S) com a queda de rigidez (C), conforme Equação 2.

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (2)$$

Onde: C_{11} e C_{12} são coeficientes de calibração do modelo.

Para prever o comportamento de fadiga do material, é necessário um critério de falha adequado. Entre os vários critérios desenvolvidos para estimar o desempenho de fadiga de misturas, atualmente, o mais usado é o proposto por Sabouri e Kim (2014), que se baseia na taxa média de liberação da pseudo-deformação (G^R) até o ciclo de falha do ensaio (N_f). Esta relação, apresentada pela Equação 3, é usada para prever, por meio de simulações, o ciclo de falha para uma determinada deformação de tração ϵ , em seguida, a previsão do dano na estrutura.

$$G^R = \gamma N_f^\Delta \quad (3)$$

Onde: γ (gama) e Δ (delta) são coeficientes de calibração do modelo.

De acordo com Kim (2009), a amplitude de deformação está associada diretamente à vida de fadiga. Assim, para um dado material, maiores amplitudes de deformação implicam menores vidas de fadiga (LEMAITRE, 1996), assim como identificado em curvas de Wöhler.

Na análise do FFM, a área sob a curva de fadiga ($N_f \times$ deformação) no espaço $\log - \log$ é calculada entre deformações de $100 \mu\epsilon$ e $200 \mu\epsilon$ (Equação 4), intervalos considerados críticos devido à sua ocorrência comum na parte inferior da camada asfáltica em campo. Valores superiores de FFM indicam um desempenho superior em termos de resistência à fadiga da mistura asfáltica. Além disso, é importante considerar a rigidez da mistura para a classificação do seu comportamento. A análise inclui a geração de um gráfico correlacionando a rigidez do material ($|E^*|$) a 20°C e 10 Hz com o FFM da mistura.

$$\text{FFM (T-C)} = \frac{\log(N_f, 200) - \log(N_f, 100)}{2} \times [\log(200) - \log(100)] \quad (4)$$

Onde: FFM (T-C) é o Fator de Fadiga da Mistura para o ensaio de fadiga por Tração-Compressão; N_{100} é o número de ciclos correspondente à deformação específica de $100 \mu\epsilon$; N_{200} é o número de ciclos corresponde à deformação específica de $200 \mu\epsilon$.

De acordo com Rocha *et al.* (2023), dependendo da posição do par $|E^*|$ e FFM no gráfico, a mistura asfáltica é classificada em uma das três classes ilustradas na Figura 2. A distribuição dessas classes na base de dados estudada demonstra um equilíbrio na distribuição das misturas com diferentes comportamentos. As misturas classificadas como classe 3 têm o melhor desempenho, pois apresentam um equilíbrio favorável entre alta resistência à fadiga (elevado FFM) e rigidez que tende a resultar em bom desempenho quanto à deformação permanente. Em contraste, as misturas classe 1



apresentam o pior desempenho, com valores baixos de FFM. Observa-se também que a maioria dessas misturas possui menor teor de ligante.

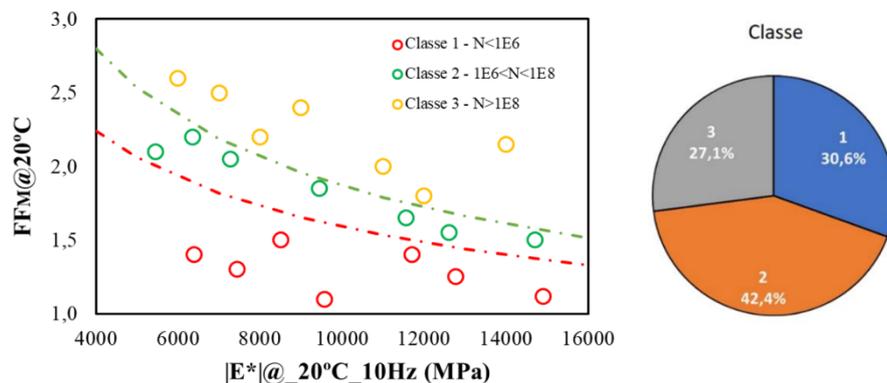


Figura 2. Classificações de misturas segundo $FFM \times |E^*|$ (ROCHA *et al.*, 2023)

Assim, os ensaios de fadiga compressão diametral e tração-compressão têm sido usados para determinar o FFM (FRITZEN *et al.*, 2019; ROCHA *et al.*, 2023) e avaliar a resistência à fadiga das misturas asfálticas. O ensaio CD é bastante conhecido no país, e possui suas origens na caracterização de resistência última à tração de concretos de cimento Portland, pelo Prof. Fernando Lobo Carneiro, sendo usado para caracterização de fadiga em misturas asfálticas desde 1980 (MEDINA e MOTTA, 2015). Apesar de prático, o ensaio não é capaz de incorporar parâmetros viscoelásticos em análises, além de apresentar efeitos de danificação no material não proporcionados apenas por fadiga (mas também por fluência excessiva), premissa fundamental das teorias de evolução do dano mais aceitas (BABADOPULOS *et al.*, 2015). Por outro lado, o ensaio de tração-compressão permite simular as condições mais realistas de carregamento e fornece uma evolução do dano ao longo do tempo. Esses ensaios ($|E^*|$ e T-C) são protocolados pelas normas AASHTO T 342 (2011) e TP 107 (2018), respectivamente. No Brasil, apenas o ensaio de $|E^*|$ é protocolado (DNIT 416/2019-ME, 2019). Embora esses ensaios sejam usados para determinar o FFM, não se sabe se há relação direta entre as classificações obtidas por meio dos dois métodos, já que possuem filosofias diferentes. Isso é importante de se investigar, especialmente porque para o ensaio CD já se dispõe de laboratórios equipados no país. Além disso, se houver uma relação, será possível caracterizar o desempenho por fadiga de misturas asfálticas com base em mecanismos do modelo S-VECD.

Por isso, estabelecer uma relação entre o FFM obtido por ensaios CD e T-C pode contribuir com a avaliação da resistência à fadiga das misturas asfálticas e suas aplicações em modelos como o S-VECD, aprimorando as previsões e análises de desempenho de pavimentos e facilitando um maior controle sobre a malha viária brasileira. Dessa forma, o objetivo deste artigo é comparar os valores de FFM obtidos por diferentes ensaios, especificamente compressão diametral e tração-compressão.

MATERIAIS

Para o presente trabalho, foram utilizadas quatro misturas asfálticas com diferentes tipos de agregados e ligantes, conforme Tabela 1.



Tabela 1. Características das misturas estudadas

| Mistura asfáltica | Parâmetro de dosagem | | | | | |
|-------------------|----------------------|------------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| | Tipo de CAP | Densidade máxima medida, Gmm | Teor de CAP (%) | Volume de vazios, Vv (%) | Faixa granulométrica (DNIT) | Tamanho máximo nominal, TMN (mm) |
| 1 | 50/70 | 2,468 | 4,0 | 4,6 | A | 25,0 |
| 2 | 60/85-E | 2,416 | 6,6 | 4,6 | C | 12,5 |
| 3 | 50/70 | 2,564 | 4,4 | 5,1 | C | 12,5 |
| 4 | 50/70 | 2,542 | 4,8 | 3,9 | C | 12,5 |

A Mistura 1 (M1) foi dosada para ser utilizada como um *binder*, camada com menor teor de ligante com agregados maiores em comparação à camada de revestimento superficial. A Mistura 2 (M2) contém ligante modificado por polímero classificado como 60/85-E. A Mistura 3 (M3) possui 15% de agregado siderúrgico, usado como uma alternativa à parte da matriz pétreo virgem e como uma destinação à subprodutos industriais. A Mistura 4 (M4) é uma solução comumente adotada na camada de rolamento, possui agregados de Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 12,5 mm e ligante classificado quanto à penetração como 50/70. As misturas M1, M2 e M4 foram dosadas pelo método Marshall, e a M3 foi dosada pelo método Superpave.

MÉTODOS

Para verificar uma possível correlação entre os valores de FFM obtidos por meio de diferentes ensaios de fadiga, propõe-se o cálculo desse parâmetro a partir de equações tradicionais da literatura, que exigem os ensaios laboratoriais de fadiga. A partir disso, pode-se traçar uma linha de tendência com o tipo de função que apresente melhor aderência entre pontos obtidos, buscando uma melhor relação entre a curva e os pontos experimentais, ou seja, um elevado valor de R^2 .

Módulo Dinâmico ($|E^*|$)

Para entender o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas estudadas, foram realizados ensaios de módulo dinâmico em três amostras padronizadas de cada material. O procedimento seguido é normatizado pela AASHTO T 342-11 (2015). As amostras foram submetidas, em diferentes temperaturas (-10; 4,4; 21,1; 37,8 e 54,4 °C), a carregamentos sinusoidais em várias frequências de carregamento (25; 10; 5; 1; e 0,1 Hz), aplicando carga de maneira que as deformações, monitoradas por três *Linear Variable Diferencial Transducers* (LVDTs), permanecessem na região viscoelástica linear (50-75 $\mu\text{m/m}$). A construção das curvas mestras das misturas foi possível através do modelo reológico 2S2P1D (2 Molas, 2 Amortecedores parabólicos, 1 Amortecedor Linear) (Olard e Di Benedetto, 2003). A Equação 5 descreve o comportamento do modelo quando submetido a cargas.

$$|E^*| (i\omega\tau) = E_\infty + \left\{ \frac{E_0 - E_\infty}{[1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}]} \right\} \quad (5)$$

Onde: E_∞ = módulo quando frequência tende a zero; E_0 = módulo quando frequência tende a infinito; δ , β = constantes adimensionais; k , h = exponenciais ligados aos amortecedores parabólicos; η = constante relacionada ao amortecedor linear; ω = frequência angular; τ = constante relacionada aos fatores de deslocamento (*shift factors*).



Fadiga por Tração-Compressão (T-C)

A caracterização de resistência a fadiga por meio do ensaio de Tração-Compressão (T-C), usando como base a AASHTO TP 107, foi realizada em amostras moldadas com 17 cm de altura, que posteriormente foram serradas no topo e base para que fossem ensaiadas com 13 cm de altura e com V_v de $4 \pm 0,5\%$. O ensaio foi padronizado para todas as misturas, realizado a $19\text{ }^\circ\text{C}$ e com aplicação de carga a 10 Hz, e posteriormente modelado por meio da metodologia do S-VECD. Os parâmetros do ensaio (C, S, G^R , Nf e α) foram calculados com o auxílio do software MATLAB, em conjunto com a série de Prony e coeficientes C1 e C2, obtidos através do ensaio de módulo dinâmico por compressão uniaxial. As curvas características de dano das misturas foram obtidas por meio da Equação 2, a partir dos coeficientes C11 e C12, previamente ajustados com a função solver do Excel.

O Fator de Fadiga da Mistura (FFM) de fadiga (T-C) é calculado pela área abaixo da curva de Wöhler, representação gráfica da deformação de cada ciclo *versus* o número de ciclos até a falha (Nf) entre 100 e 200 $\mu\epsilon$, conforme apresentado anteriormente (NASCIMENTO, 2015). Para uma comparação entre os FFM's a partir de diferentes ensaios, optou-se pela construção da curva de Wöhler do ensaio T-C na temperatura de realização do ensaio de fadiga CD (25°C), essa adaptação foi possível pelo uso dos *shifts factors* do ensaio de módulo dinâmico.

Fadiga por Compressão Diametral (CD)

O ensaio de CD é uma derivação do ensaio de Resistência à Tração (RT), no qual a amostra é submetida a cargas equivalentes a proporções fixas do RT de uma mistura, analisando em quantos ciclos a amostra ensaiada é rompida. A curva característica de dano da mistura é feita conforme a Equação (6), a partir dos dados experimentais da mistura. O ensaio foi realizado conforme DNIT-ME 183 (2018), com aplicações de carga de 1 Hz em câmara com temperatura controlada (25°C).

$$N = k_1 \times \left(\frac{1}{\epsilon_i}\right)^{k_2} \quad (6)$$

Onde: k_1 e k_2 = constantes da mistura; N = número de ciclos até a falha; ϵ_i = deformação de tração inicial.

O FFM (CD), da mesma forma que o FFM (T-C) é obtido através das curvas de Wöhler, relacionando, no entanto, o número de ciclos até a falha (N) com a deformação de tração inicial (E_0). O FFM (CD) foi calculado conforme Equação 1, buscando obter a área embaixo da curva correspondente à faixa de valores entre 100 e 250 $\mu\epsilon$ de deformação resiliente

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Módulo Dinâmico ($|E^*|$)

Os resultados experimentais foram analisados para se encaixar no modelo 2S2P1D, buscando um ajuste das constantes do modelo de modo que os dados experimentais tenham aderência em relação aos dados modelados. As constantes usadas na modelagem das misturas e as constantes C1 e C2 de translação para outras temperaturas (*shift factors*) de William, Landel e Ferry (WLF) estão apresentadas na Tabela 2.



Tabela 2. Coeficientes de calibração do modelo de módulo dinâmico

| Misturas | Constantes de calibração de $ E^* $ | | | | | | | Valores de <i>shift factor</i> (WFL) | |
|----------|-------------------------------------|----------|------|------|----------|--------|---------|--------------------------------------|--------|
| | E00 (MPa) | E0 (MPa) | k | h | Δ | tE (s) | β | C1 | C2 |
| 1 | 87 | 35.500 | 0,25 | 0,62 | 2,70 | 0,090 | 60 | 19,76 | 150,86 |
| 2 | 105 | 28.000 | 0,26 | 0,55 | 2,95 | 0,045 | 60 | 17,86 | 141,29 |
| 3 | 75 | 38.500 | 0,24 | 0,57 | 2,00 | 0,035 | 63 | 18,31 | 117,01 |
| 4 | 45 | 31.000 | 0,26 | 0,58 | 2,80 | 0,100 | 30 | 14,87 | 140,57 |

A representação da curva mestra é feita, em escala log-log, com o resultado dos módulos e a frequência reduzida, medida que junta os efeitos da frequência de aplicação de carga e a temperatura de ensaio através do princípio de superposição tempo-temperatura (TTSP) (NGUYEN *et al.*, 2009). As curvas mestras das misturas e os dados experimentais estão representados na Figura 3. Os resultados indicam uma menor rigidez para a mistura M2 em frequências maiores (baixas temperaturas), enquanto as outras ficaram em patamares parecidos. Para frequências menores (altas temperaturas), essa mistura tem uma rigidez mais elevada, indicando um comportamento típico daquele observado para misturas asfálticas modificadas por polímero. Por outro lado, a mistura 04 tem baixa rigidez em baixas frequências (altas temperaturas), indicando a previsão de um comportamento ruim em relação ao defeito de deformação permanente.

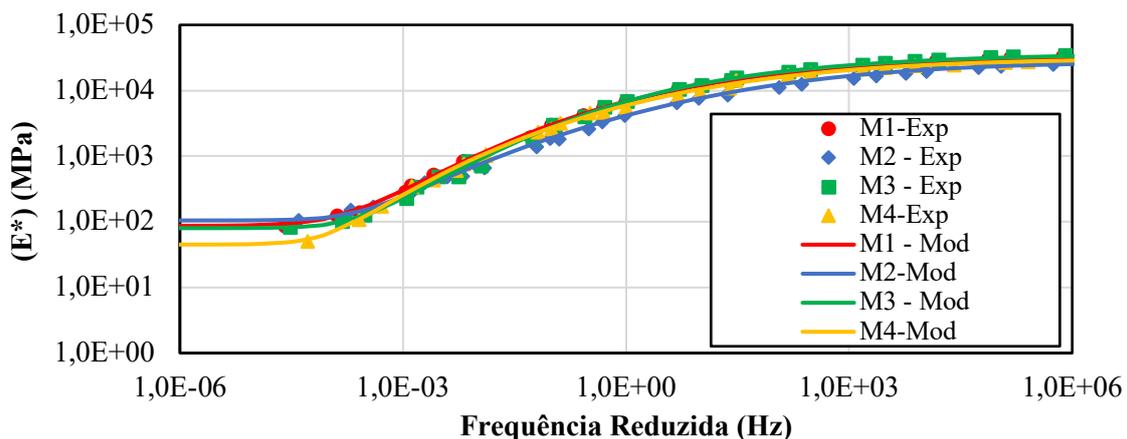


Figura 3. Curvas mestras de módulo dinâmico das misturas asfálticas

Fadiga por Tração-Compressão (T-C)

O ensaio de fadiga T-C foi realizado a 19 °C, com variação nas deformações nominais, observando como critérios de aceitação do ensaio a ruptura no terço médio (zona de medida dos LVDTs) e com número de ciclos até a ruptura (N_f) mínimo de 500 ciclos de ensaio (50 s). A representação das curvas características de dano das misturas (C vs S) são dispostas na Figura 4, para diferentes valores de amplitude de deformação (*initial strain amplitude, ISA*). Os coeficientes C11 e C12, obtidos através dos dados experimentais da curva característica de dano, das curvas G^R vs N_f e as constantes α e E_{lve} , usadas na construção das curvas de Wöhler, são apresentados na Tabela 3.

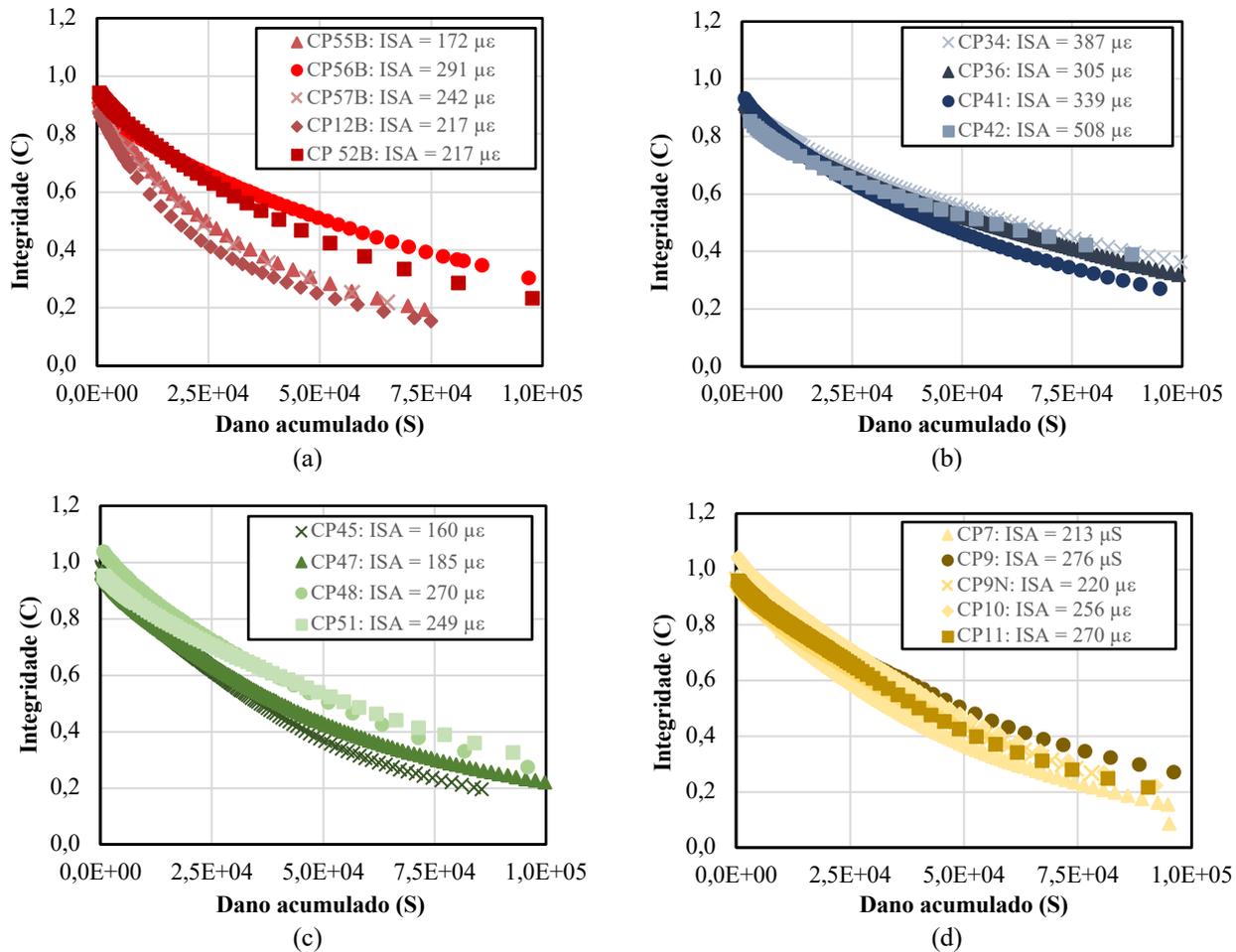


Figura 4. Curvas C vs S experimentais das misturas (a) M1, (b) M2, (c) M3 e (d) M4

Tabela 3. Parâmetros de modelagem do ensaio de fadiga T-C

| Mistura | α | C vs S | | G^R vs Nf | | E_{lve} (MPa) |
|---------|----------|--------|--------|-------------|----------|-----------------|
| | | C11 | C12 | Y | Δ | |
| 1 | 2,9659 | 0,0033 | 0,4790 | 6,24E+06 | -1,20348 | 1,31E+04 |
| 2 | 3,4002 | 0,0028 | 0,4747 | 5,84E+06 | -1,21319 | 8,27E+03 |
| 3 | 2,7778 | 0,0005 | 0,6410 | 1,34E+09 | -1,80715 | 1,35E+04 |
| 4 | 2,9365 | 2,9365 | 0,6716 | 1,22E+06 | -1,10802 | 1,15E+04 |

As curvas de Wöhler (Figura 5a) demonstram a sensibilidade de cada mistura a partir da alteração da deformação imposta em cada ciclo. Os resultados corroboram com os dados obtidos para a mistura M2, devido à adição de polímero, porém em relação às misturas M1, M3 e M4, há comportamentos parecidos em deformações mais altas, com a mistura M3 se mostrando menos sensível à diminuição de deformações, o que influenciou o menor valor do FFM (T-C).



A Figura 5a foi construída levando-se em consideração a temperatura de realização do ensaio CD (25°C), através dos *shift factors* do módulo complexo (E^*), e buscando minimizar as diferenças entre os dois ensaios estudados. Além disso, levou-se em consideração para sua construção as deformações 50, 100, 200 e 250 $\mu\epsilon$, obtidas através da modelagem característica na construção das curvas de Wöhler para o ensaio de T-C. Foram modeladas também, para obter o tráfego indicado (Figura 2), as curvas a 20°C.

Fadiga por Compressão Diametral (CD)

Foram realizados vários ensaios a 25 °C, com tensões diferentes para cada mistura. Os resultados estão dispostos na Figura 5b com as correspondentes curvas de tendência resultantes dos dados experimentais. Os comportamentos de resistência à fadiga observados (CD e T-C) apresentam curvas de Wöhler, de modo geral, semelhantes entre si. Foram observadas variações na ordem da curva do ensaio CD, possivelmente devido a presença de pontos *outliers* na M4.

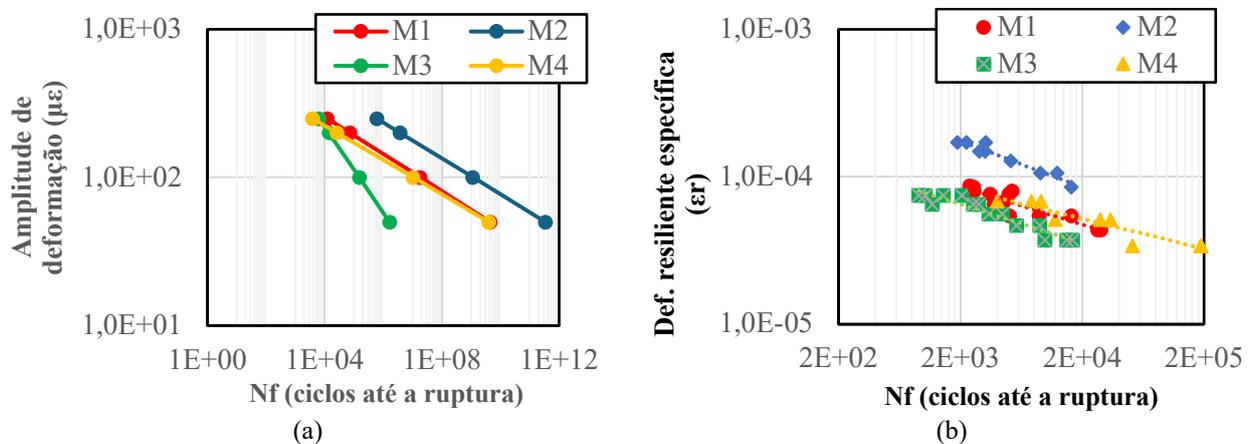


Figura 5. Curvas de Wöhler das misturas estudadas: (a) fadiga T-C e (b) fadiga CD

Para comparar a eficiência das misturas, e como a representação dos seus resultados são diferidas, optou-se por realizar uma comparação entre o FFM de ambos os ensaios de fadiga. O FFM (T-C) foi superior ao FFM (CD) em todos os casos, conforme apresentado na Tabela 4. O método de ensaio por T-C pode ser mais representativo do fenômeno da fadiga em razão das condições de carregamento e deformações ditas homogêneas (OLIVEIRA, 2019). No entanto, embora com poucos pontos de comparação, foi possível comparar o FFM entre os dois tipos de ensaio com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,98, conforme Figura 6, podendo também ser observado um valor de FFM (T-C) sempre mais alto que o FFM (CD). Pelos critérios estabelecidos pela Figura 1, para CD e pela Figura 2 para T-C, as misturas estudadas seriam recomendadas para os tráfegos mostrados na Tabela 5.

Tabela 4. Valores de FFM para ensaios de fadiga por tração-compressão (T-C) e compressão diametral (CD)

| FFM | M1 | M2 | M3 | M4 |
|------------|------|------|------|------|
| T-C (25°C) | 1,82 | 2,35 | 1,40 | 1,72 |
| T-C (20°C) | 1,92 | 2,44 | 1,46 | 1,87 |
| CD | 1,01 | 1,37 | 0,79 | 0,84 |



Tabela 5. Volume de tráfego indicado para as misturas estudadas

| Ensaio | M1 | M2 | M3 | M4 |
|--------|--------|--------|----------|----------|
| T-C | >1E+08 | >1E+08 | <1E+06 | <1E+08 |
| CD | <1E+07 | >1E+07 | <7,5E+06 | <7,5E+06 |

Embora já tenham sido realizados trabalhos que comparem o FFM dos dois tipos de ensaio, (CUSTÓDIO, 2022), não foram encontrados resultados representativos entre os FFMs de uma mesma mistura entre os dois ensaios estudados. Como não há consenso estabelecido para o cálculo desse fator no ensaio de fadiga T-C, é difícil a inclusão de outros trabalhos da literatura na comparação dos resultados deste artigo, em virtude da variação dos parâmetros da Equação 4, que no trabalho mencionado utilizou deformações entre 150 e 250 $\mu\epsilon$, levando a áreas diferentes em razão da escala log-log, e por consequência, FFMs diferentes. Também no trabalho citado não foi realizada correlação entre os fatores que pudessem sugerir algum tipo de ligação entre ambos.

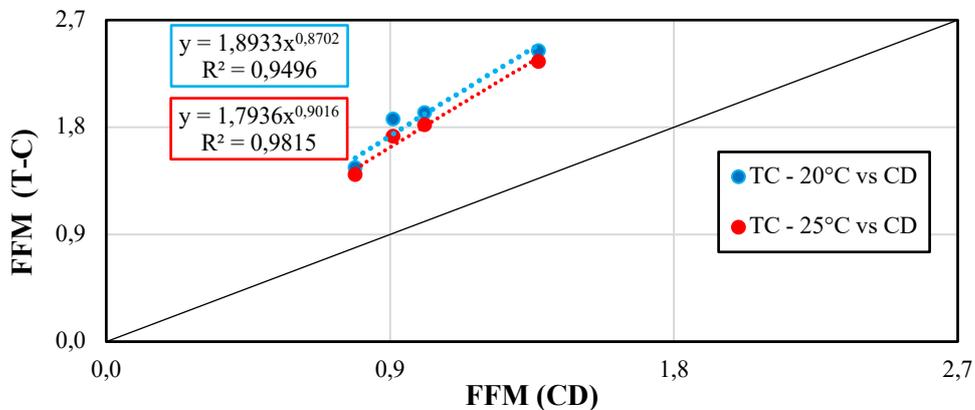


Figura 6. Comparação entre valores de FFM (T-C) e de FFM (CD)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo buscou realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos ensaios CD e T-C para quatro diferentes misturas asfálticas. Ao comparar os Fatores de Fadiga da Mistura (FFM) obtidos, observa-se que cada método oferece uma perspectiva única sobre a resistência à fadiga das misturas. O ensaio CD é aceito como uma abordagem padrão. No entanto, o ensaio T-C oferece uma análise da resposta mecânica ao longo do tempo, permitindo a observação de mudanças na rigidez e na evolução do dano. Na comparação apresentada, há indícios de que os FFMs obtidos nos ensaios T-C e CD apresentam diferenças, sendo o FFM (T-C) sempre mais alto que o FFM (CD). Além disso, a curva de Wöhler para o ensaio T-C, padronizando as temperaturas para fins de comparação, proporcionou uma melhor representação. Quanto à resistência estimada do tráfego, as classificações usadas em ambos os ensaios apresentam discrepâncias significativas, levantando-se questionamentos quanto à validade de representação de diferentes materiais em uma mesma categoria de resistência ao tráfego ou mesmo da capacidade do modelo de classe de fadiga em representar com acurácia o comportamento esperado.



AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- AASHTO TP 107-14. Determining the damage characteristic curve of asphalt concrete from direct tension cyclic fatigue tests. Provisional standard. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2018.
- AASHTO T 342. Determining dynamic modulus of hot mix asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2011.
- BABADOPULUS, L. F. A. L., SOARES, J. B., CASTELO BRANCO, V. T. F. Interpreting fatigue tests in hot mix asphalt (HMA) using concepts from viscoelasticity and damage mechanics. *Revista Transportes*, vol. 23(2), 2015.
- BOEIRA, F. D., PINHEIRO, G. S., SPECHT, L. P., DRUZIAN, E. L., JUST, M. L., BABADOPULOS, L. F. A. L., NASCIMENTO, L. A. H., PEREIRA, D. S. Projeto e implementação de ensaio de fadiga por tração-compressão direta (uniaxial) para avaliação de dano em misturas asfálticas. *Revista Matéria*, vol. 23(3), 2018.
- CUSTODIO, D.A.S. 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, 2022.
- DNIT 183/2018 – ME. Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- FRITZEN, M. A., FRANCO, F. A. C. P., NASCIMENTO, L. A. Classificação de misturas asfálticas quanto ao desempenho à fadiga. In: 9º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2019.
- GUDIPUDI, P. P., UNDERWOOD, B. S. Reliability analysis of fatigue life prediction from the viscoelastic continuum damage model. *Transportation Research Record*, vol. 2576(1), 2016.
- OLIVEIRA, J. A. Avaliação do impacto da metodologia FAD-CI de seleção granulométrica na vida de fadiga de misturas asfálticas. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- LEMAITRE, J. A course on damage mechanics, Springer Berlin, Heidelberg, 1996.
- LUCAS JÚNIOR, J. L. O., PORTELA NETO, M. G., SOARES, J. B. The effect of aggregate-binder adhesion in fatigue and moisture damage resistance in asphalt mixtures. In: The International Society for Asphalt Pavements, Fortaleza, 2018.
- NASCIMENTO, L. A. H., Implementation and validation of the viscoelastic continuum damage theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil. Tese de Doutorado. North Caroline State University, Raleigh, 2015.
- MEDINA, J., MOTTA, L.M.G. *Mecânica dos Pavimentos*, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2015.
- ROCHA, M. L., ESPINDOLA, R. P., ARAGÃO, F. T. S. Previsão de resistência à fadiga de misturas asfálticas: uma abordagem orientada por dados. In: 37º Congresso de pesquisa e ensino em transportes, Santos, 2023.
- ROQUE, R., ZOU, J., KIM, Y. R., BAEK, C., THIRUNAVUKKARASU, S., UNDERWOOD, B. S., GUDDATI, M. N. Top-down cracking of hot-mix asphalt layers: Models for initiation and propagation. NCHRP Project 1-42A. NCHRP, Washington, 2010.
- SABOURI, M., KIM, Y. R. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading. *Transportation Research Record*, vol. 2447(1), 2014.
- SAFAEI, F., CASTORENA, C., KIM, Y. R. Linking asphalt binder fatigue to asphalt mixture fatigue performance using viscoelastic continuum damage modeling. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, vol. 20, 2016.



SILVA, L. S. V., BASTOS, J. B. S., LUCAS JÚNIOR, J. L. O., BABADOPULOS, L. F. A. L., SOARES, J. B. Evaluation of moisture-induced damage on the fatigue life of asphalt mixtures using failure tests of asphalt binders, interfaces, and mixtures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 47(7), 2024.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R., GUDDATI, M., PELLINEN, T., RONGZONG, W., KING, G., KLUTTZ, R., GIBSON, N. Characterization and performance prediction of ALF mixtures using a viscoelastoplastic continuum damage model. In: *Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions 2006 Annual Meeting*, 2006.

ZENG, Z., KIM, Y. R., UNDERWOOD, B. S., GUDDATI, M. Asphalt mixture fatigue damage and failure predictions using the simplified viscoelastic continuum damage (S-VECD) model. *International Journal of Fatigue*, vol. 174, 2023.