TRANSPORTES
revistatransportes.org.br
anpet
associação nacional de pesquisa e ensino em transportes
anpet.org.br

Fundamentos de mecânica do dano e de viscoelasticidade para prever desempenho de misturas asfálticas quanto à fadiga

Damage mechanics and viscoelasticity fundamentals to predict fatigue performance of asphalt mixtures

Jardel Andrade de Oliveira[1], **Jorge Luiz Oliveira Lucas Júnior**[2], **Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos**[2], **Jorge Barbosa Soares**[2]

[1]Universidade de Fortaleza, Fortaleza, Ceará, Brasil

[2]Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil

Contato: jardel@det.ufc.br, (JAO); j.lucas.j@det.ufc.br, (JLOLJ); babadopulos@ufc.br, (LFALB); jsoares@det.ufc.br, (JBS)

Recebido:
17 de março de 2022
Aceito para publicação:
6 de julho de 2023
Publicado:
29 de dezembro de 2023

Editor de Área:
Kamilla Vasconcelos, Universidade de São Paulo, Brasil

Palavras-chave:
Pavimentos asfálticos.
Misturas asfálticas.
Fadiga.
Dano.

Keywords:
Asphalt pavements.
Asphalt mixtures.
Fatigue.
Damage.

DOI: 10.58922/transportes.v31i3.2745

OPEN ACCESS
CC BY

RESUMO

No Brasil, a fadiga de misturas asfálticas tem sido avaliada principalmente pelo ensaio por compressão diametral. Ele apresenta limitações, como o estado não homogêneo de tensões, a incapacidade de diferenciar o dano sofrido por fadiga do dano sofrido por fluência e a não consideração do aquecimento das amostras durante a execução do ensaio. Mesmo que também apresente a última limitação, acredita-se que o ensaio de fadiga por tração-compressão seja hoje o mais capaz de incorporar um maior número de variáveis, assim possibilitando uma melhor compreensão da fadiga em misturas asfálticas. A utilização do ensaio de fadiga por tração-compressão tem o potencial de alcançar um maior número de centros de pesquisas nacionais, seja pela acurácia dos resultados e/ou pelo menor tempo para caracterizar uma mistura. O presente artigo tem como objetivo contribuir para o entendimento e a popularização do ensaio de fadiga por tração-compressão, esclarecendo hipóteses simplificadoras adotadas. Para isso, abordam-se teorias que permeiam o referido ensaio, bem como o modelo *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD) e apresenta-se uma implementação do uso de seus resultados para previsão de desempenho de pavimentos. Como exemplo de uso, duas misturas (M1 e M2) tiveram as suas vidas de fadiga avaliadas. Em seguida, os trincamentos por fadiga de dois pavimentos (P1 e P2) foram simulados. Os pavimentos simulados diferindo apenas pelas suas camadas de revestimento, pois empregam M1 e M2, respectivamente. Tanto na análise do material (misturas M1 e M2), como na simulação dos pavimentos (P1 e P2), o ranqueamento de desempenho foi o mesmo.

ABSTRACT

In Brazil, asphalt mixture fatigue has been evaluated with the diametrical compression test. It has limitations, such as the non-homogeneous state of stresses and inability to differentiate the damage due to fatigue from the one due to creep, as well not considering the existent self-heating of the specimen. Even if the tension-compression fatigue test also presents that last limitation, it is believed that it is today the most capable of incorporating a greater number of variables, thus enabling a better understanding of fatigue in asphalt mixtures.

Its use has the potential to reach a larger number of national research centers, either because of the accuracy of the results or because of the shorter time to characterize a mixture. This article aims to contribute to the understanding and popularization of the tension-compression fatigue test, clarifying simplification hypotheses adopted. For that, details and theories that permeate the referred laboratory test, as well as its data treatment using the Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD) model and an implementation of its results to predict pavement performance. As an example of utilization, two mixtures (M1 and M2) had their fatigue life evaluated. Then, the fatigue cracking of two pavements (P1 and P2) were computationally simulated. The simulated pavements are composed of the same sublayers, differing only in the asphalt layer, as they employ M1 and M2, respectively. Both in the material analysis (mixtures M1 and M2) and in the pavements' simulation (P1 and P2) the performance ranking was the same.

1. INTRODUÇÃO

A elevada dependência do setor rodoviário combinada com o alto percentual de pavimentos apresentando defeitos em campo (CNT, 2021) é deletéria para a competitividade de produtos brasileiros. A fadiga, muitas vezes apontada como a principal falha em pavimentos, é um dos defeitos que mais instiga pesquisadores. O fenômeno é bastante complexo e, além disso, é desafiador obter relações confiáveis entre ensaios de laboratório e o que de fato ocorre em campo em termos de trincamento.

Por meio de trechos experimentais, a Rede de Tecnologia em Asfalto (RTA) contribuiu para o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) apoiado pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) como um potencial substituto do método empírico de dimensionamento vigente há décadas no Brasil. No novo método, faz-se uso do ensaio de fadiga por compressão diametral (DNIT, 2018a), realizado no Brasil há muitos anos (Bernucci et al., 2010). Outra condição de ensaio de fadiga, por tração-compressão (Di Benedetto et al., 2004), vem sendo considerada para avaliar o comportamento do material e, dependendo do modelo de dano adotado, pode apresentar baixos tempos de execução (Underwood, Baek e Kim, 2012). Há diversas possibilidades de ensaios laboratoriais que avaliam a fadiga de misturas, cada uma apresentando variações/limitações. Dessa maneira, recomenda-se que as diversas lógicas de análise sejam avaliadas sempre com vistas a se usar o teste capaz de caracterizar com maior eficácia o defeito investigado.

O presente artigo tem como objetivo contribuir para o entendimento e a popularização da realização do ensaio de fadiga por tração-compressão, esclarecendo hipóteses simplificadoras adotadas e investigando interpretações de resultados para exemplos com materiais reais. Para atender a estes objetivos, incorporou-se à fundamentação teórica o tópico denominado de fundamentos básicos da análise de fadiga. Fez-se ainda avaliações da susceptibilidade à fadiga de duas misturas asfálticas (M1 e M2) considerando duas perspectivas: (i) do material, com obtenção de curvas de Wöhler por simulação do comportamento e (ii) da estrutura do pavimento, com previsão de trincamento por simulação do comportamento de duas estruturas (P1 e P2). Destaca-se que P1 e P2

diferem apenas na camada de revestimento, pois empregam respectivamente M1 e M2. As demais camadas dos pavimentos simulados são iguais.

Adotou-se o procedimento apresentado na proposta de norma da AASHTO TP 107 (AASHTO, 2020) para a caracterização do dano na mistura asfáltica, que trata, além da execução do ensaio, da obtenção de propriedades do modelo *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Fundamentos básicos da análise de fadiga

Podem ser sublinhadas duas características principais de ensaios mecânicos em geral: (i) geometria da amostra, que acaba por se relacionar com a forma como o carregamento é aplicado e medido, bem como com a maneira de medir a deformação; (ii) percurso de carregamento, que pode ser monotônico ou cíclico, ou ainda apresentar diversos formatos de função de carregamento, com presença de repouso, etc. No caso da presença de não linearidades, como a produzida nos ensaios de fadiga, a escolha dessas duas características é fundamental (Di Benedetto et al., 2001, 2004). Para simplificar a análise sem perder a qualidade da caracterização, deve-se buscar ensaios que não produzam efeitos não relacionados à fadiga. Neste sentido, ensaios homogêneos, como o de tração-compressão, com deslocamento ou deformação controlados e com alternância de direção de carregamento devem ser preferidos.

Entre as geometrias de ensaio de fadiga comumente consideradas (viga, cilindro esbelto ou espesso) e suas formas de carregamento (flexão, compressão diametral e tração-compressão), somente o ensaio por tração-compressão apresenta estados de tensões e de deformações teoricamente homogêneos. A ensaios deste tipo, dá-se o nome de ensaios homogêneos, enquanto os demais são chamados ensaios não-homogêneos. Os ensaios homogêneos são mais adequados para a investigar a fadiga do que os não homogêneos, pois nesses últimos há violações de hipóteses simplificadoras utilizadas na análise dos resultados (Oliveira, 2019; Babadopulos, Soares e Castelo Branco, 2015; Almeida, 2019). A razão é simples, mas precisa ser melhor difundida, o que se tenta fazer no presente artigo.

Em ensaios homogêneos, a tensão pode ser calculada diretamente a partir de medidas obtidas no contorno do corpo-de-prova (CP) com uma célula de carga e com dispositivos de medida de deslocamento (como *Linear Variable Differential Transformer* – LVDTs) e da consideração da geometria adotada. O exemplo clássico é o do cálculo da tensão de tração ($\sigma = F/A_t$) oriunda da força de tração uniaxial (F) uniformemente distribuída sobre a área transversal (A_t) de um CP. O comportamento reológico (elástico linear ou não-linear, viscoelástico linear ou não-linear, viscoelastoplático, com ou sem dano, etc.) do material testado não tem qualquer influência no cálculo das tensões, desde que o ensaio possa ser considerado homogêneo, o que é uma hipótese fundamental da Mecânica dos Meios Contínuos (Reddy e Gartling, 2010). A referida hipótese impõe condições ao distanciamento entre as escalas da menor dimensão do CP e da maior dimensão das

heterogeneidades, adotada, em função da aplicação, como algo em torno de 3 a 10 vezes para a razão entre essas dimensões (Hill, 1963). Raciocínio semelhante pode ser elaborado para o cálculo de deformações.

Já em ensaios não-homogêneos, o cálculo das tensões e/ou das deformações é feito a partir da solução de um problema de valor de contorno, que envolverá necessariamente a utilização de uma equação constitutiva (elástico linear ou não-linear, viscoelástico linear ou não-linear, viscoelastoplático, com ou sem dano, etc.), o que é uma hipótese suplementar, não necessária nos ensaios homogêneos. Ou seja, precisa-se *a priori* estabelecer uma hipótese sobre o comportamento reológico do material para, em seguida, estabelecer-se uma equação para obtenção dos campos de tensões e de deformações, em um procedimento que se assemelha a um cálculo inverso (retroanálise) que estabelece o melhor valor do parâmetro de modelo que explicaria aproximadamente os resultados médios obtidos. A escolha do modelo constitutivo tem fundamental relevância no resultado da análise de tensões e deformações. Sendo assim, caso o comportamento do material não respeite a hipótese original feita sobre ele, o cálculo realizado simplesmente não é válido. Idealmente, ao invés de tensões e deformações, além do módulo, em ensaios não homogêneos, deveriam ser tecidas análises sobre cargas (ou torques) e deslocamentos (ou deslocamentos angulares), além da rigidez, para evitar o erro fundamental referido anteriormente.

Em ensaios sem danificação do CP, a adoção de testes não-homogêneos pode ser eficiente, desde que haja segurança sobre o tipo de comportamento do material testado e que a equação adotada no cálculo seja a mais adequada. Já em ensaios com dano, porém, não é possível no ensaio que busca determinar como o dano se desenvolve, saber *a priori* como o mesmo ocorre. Apesar de a carga aplicada em um ensaio não-homogêneo frequentemente ser controlada, a tensão, a rigor, não o é (Babadopulos, Soares e Castelo Branco, 2015). Por este motivo, a própria taxonomia associada ao Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à "Tensão Controlada" é inapropriada. Ademais, o cálculo de tensões e deformações, e, consequentemente, o cálculo de propriedades que relacionem tensões e deformações (Módulo Dinâmico – $|E^*|$ ou Módulo de Resiliência – MR) ao longo dos ciclos fica comprometido. Idealmente, em vez de módulo, a nomenclatura do parâmetro obtido em ensaios não homogêneos deveria ser a rigidez.

A Figura 1 ilustra os ensaios de fadiga por (a) compressão diametral, (b) flexão em viga e (c) tração-compressão. Nos dois primeiros casos, por conta da não homogeneidade dos ensaios, as equações só são válidas para determinar tensões e deformações em um CP sem dano. Já no ensaio por tração-compressão (c – homogêneo) as equações são válidas também para calcular tensões e deformações em qualquer situação de danificação. Pelas razões discutidas, entre essas opções, a única que apresenta um ensaio homogêneo, com carregamento de vaivém e, portanto, a única capaz de obter propriedades fundamentais do material testado quanto à fadiga, é o ensaio de tração-compressão.

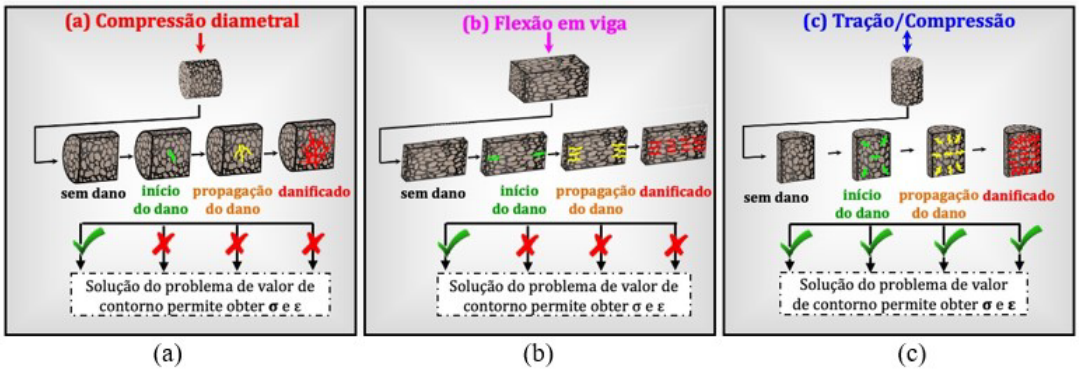


Figura 1. Ilustração da inadequação dos ensaios não homogêneos (com dano) para caracterizar a fadiga.

Quanto ao percurso de carregamento, é importante notar que, à exceção de materiais elásticos (cujo comportamento mecânico é reversível de maneira instantânea), há fluência quando o carregamento não oscila em torno de um eixo que representa a ausência de deformação. Além disso, a fluência excessiva leva ao dano e, em última avaliação, à ruptura. Ensaios de flexão e de tração-compressão direta (que não sejam de tensão controlada) respeitam essa característica da oscilação para o estudo do comportamento de fadiga dos materiais asfálticos. Porém, no caso do ensaio de compressão diametral, o carregamento é sempre no mesmo sentido, transmitindo-se tensões sempre de compressão ou sempre de tração em um dado ponto e uma dada direção no material. Dessa maneira, há a certeza de que a fluência ocorre. Considerando este ensaio, determinar quanto de dano está associado à fluência ainda não é possível, devido à complicação fundamental mencionada anteriormente quanto à solução do problema de valor de contorno em materiais viscoelásticos com dano. Portanto, a tarefa de determinar, ao longo do ensaio de fadiga por compressão diametral, o que é proveniente do dano por fadiga e o que é proveniente simplesmente da fluência não é possível, à luz do conhecimento atual. Dessa maneira, assim como se mostrou que o termo "tensão controlada" é usado inadequadamente no nome do ensaio adotado no Brasil, a própria nomenclatura de "fadiga" traz uma incoerência.

É importante avaliar o tempo de duração do procedimento, pois, entende-se que este aspecto é relevante para a seleção do ensaio de fadiga a ser adotado. Conforme descrito na norma DNIT 183 (DNIT, 2018a), são necessários quatro níveis de tensão entre 5 e 40% (exemplo 5; 10; 20 e 30%). A experiência do laboratório no qual foram realizados os ensaios da presente pesquisa aponta que na execução deste ensaio específico, quando o procedimento é executado para atender os menores percentuais de resistência à tração, o mesmo pode demorar algumas semanas, ultrapassando-se um mês para caracterizar uma única mistura.

Alguns autores (Babadopulos, Soares e Castelo Branco, 2015; Fritzen, 2016) avaliaram a fadiga de misturas asfálticas com o emprego dos ensaios por tração-compressão e/ou por compressão diametral e/ou flexão em viga 4 pontos.

Concluíram que misturas caracterizadas pelo ensaio por tração-compressão com semelhante susceptibilidade à fadiga, eram ranqueadas de forma diferente pelo ensaio por compressão diametral, pois esse último costuma apontar que as misturas com maior rigidez apresentam maior resistência à fadiga. Percepção reforçada por Oliveira (2013) e por Oliveira (2014), estes autores estudaram a fadiga de misturas asfálticas com o emprego do ensaio por compressão diametral, os testes conduzidos indicaram maiores resistências à fadiga para as misturas com maiores valores de rigidez (MR). Bernucci et al. (2010) corroboram, alertando que há uma tendência, quase sempre inadequada, de considerar misturas com rigidez mais elevada como melhores ao se realizar o ensaio de fadiga por compressão diametral. Sublinha-se, ainda, que, considerando que o ensaio apresenta fluência, é esperado que materiais mais rígidos demorem mais tempo para apresentar fluência excessiva. Finalmente, há divergência entre esse padrão de resultado no ensaio por compressão diametral e observações de campo quanto à fadiga de misturas com maior módulo (Medina e Motta, 2015).

Babadopulos, Soares e Castelo Branco (2015) compararam, com foco nos ensaios de caracterização e em curvas de Wöhler, resultados de fadiga a nível de material para misturas asfálticas em diferentes condições de envelhecimento. Já o presente artigo, além de buscar tornar mais claro o procedimento a nível de material, utiliza os resultados para previsão de desempenho de pavimentos, incrementando a discussão com vistas a futuros sistemas de dimensionamento que naturalmente advirão dentro do processo de contínuo aperfeiçoamento dos métodos de projeto.

Não existe ensaio que, em laboratório, represente com perfeita exatidão o comportamento de campo. Contudo, é importante que se busquem continuamente procedimentos mais fiéis, com representações de base física de propriedades fundamentais que permitam a simulação computacional do comportamento de campo e, consequentemente, um melhoramento da correlação dos resultados obtidos em laboratório. Este melhoramento levará a modelos melhor calibrados com relação às observações feitas em misturas aplicadas em pavimentos. Sublinha-se, portanto, além da importância da evolução dos procedimentos de ensaio e análise, a imprescindível disponibilidade de dados de trincamento medidos em campo na maior qualidade (o que depende do arcabouço teórico sendo adotado) e quantidade possíveis.

É necessário perceber que, além da escolha do ensaio, é importante selecionar um mecanismo de análise eficiente. A combinação do ensaio de tração-compressão, executado com amplitudes de carregamento mais elevadas, em conjunto com um modelo de dano contínuo [*Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*, AASHTO TP 107, AASHTO (2020)] é apontado pela *Federal Highway Administration* (FHWA) como a metodologia mais promissora para caracterizar a fadiga de misturas asfálticas, por aliar um equilíbrio entre fundamentação e tempo curto de ensaio. O uso do referido ensaio no dimensionamento de pavimentos pode vir a representar um incremento de acurácia nas previsões de desempenho. Todavia, ainda que isso não ocorra num primeiro momento (sempre se dependerá de uma base de dados razoável), é o caminho indicado quando se considera o mais confiável conhecimento da Mecânica dos Materiais (Soares, 2020). Reconhece-se, contudo,

dificuldades de ordem prática existentes no Brasil relativas à execução do ensaio de tração-compressão, que segue limitado a alguns grupos de pesquisa. Entretanto, esse tipo de dificuldade é cada vez menor e deve ser combatida. Para sustentar a última afirmação, os autores fizeram uma pesquisa de mercado (em janeiro de 2023), verificando preços de uma prensa hidráulica europeia (de marca consolidada no mercado e capaz de atender todos os ensaios do MeDiNa) e de uma prensa pneumática nacional (equipamento capaz de realizar ensaio de rigidez e fadiga em misturas asfálticas apenas). O equipamento nacional custava, aproximadamente, o dobro do equipamento europeu.

Por fim, é importante pontuar que nos últimos anos, diversos autores nacionais vêm estudando fadiga de misturas, considerando diferentes ensaios (Babadopulos, 2014; Nascimento, 2015; Fritzen, 2016; Boeira et al., 2018; Almeida, 2019; Santos, Soares e Babadopulos, 2020; Schuster et al., 2023; Oliveira, Soares e Nascimento, 2021; Lucas, 2021). Este aspecto é positivo para a popularização desse importante tema.

2.2. Dano por fadiga e mecânica do dano contínuo

Nos últimos anos, o meio científico nacional vem se dedicando a estudar a fadiga de misturas asfálticas e buscando uma harmonização na nomenclatura e compreensão do fenômeno (Babadopulos, 2014; Nascimento, 2015; Fritzen, 2016; Santiago, Silva e Soares, 2018; Santiago, Babadopulos e Soares, 2020). Sob a óptica da mecânica do dano contínuo, o dano deve ser avaliado pela observação da densidade efetiva de microtrincas. Tem-se que o indicador clássico de dano D (Lemaitre, 1996) equivale à razão entre a área efetivamente trincada e a área total da seção transversal da amostra. Esta variável busca relacionar a área de seção resistente perdida pela presença de microdefeitos em relação à área total intacta, variando, portanto, de 0 (material intacto) a 1 (material sem qualquer contato resistente entre duas faces, completamente rompido). Outro indicador clássico é o de Integridade (C) proposto inicialmente por Kachanov (1958) com a letra Φ, que consiste na razão entre a área efetivamente resistente e a área resistente inicial. A integridade é, portanto, o complemento em relação a 1 do Dano D. Como é difícil medir as áreas resistentes perdidas pela presença dos microdefeitos, classicamente, para materiais elásticos, se mede o módulo de elasticidade aparente ($\widetilde{E}$) dos materiais. Em seguida, este é relacionado com o valor de D ou de C, considerando que, à parte os microdefeitos, os pontos materiais permanecem com seu módulo intacto (E), o que se traduz pela Equação 1.

$$\widetilde{E} = (1 - D)E = C.E \tag{1}$$

Para materiais que têm como origem da variação de módulo outros fenômenos, como é o caso de materiais asfálticos (Mangiafico et al., 2015; Babadopulos et al., 2019), essa obtenção das variáveis de dano a partir de variações de módulo deve ser enxergada com cautela. Seguindo a literatura hoje adotada no Brasil, porém, no presente estudo o dano por fadiga será considerado como a perda paulatina da rigidez da mistura asfáltica (CP em laboratório e revestimento em campo) sujeita às solicitações, sem consideração de outros fenômenos, da mesma maneira que é adotado no modelo S-VECD.

Em pavimentos, falhas por fadiga se expressam na forma de trincas, avaliadas pela medição do percentual de Área Trincada (%AT) na superfície. Já em laboratório, a falha pode ser identificada com a ruptura da amostra ensaiada (rompimento completo do CP) ou a partir de alterações observadas nas medidas macroscópicas no volume do CP, como o pico de ângulo de fase ao longo dos ciclos (Goodrich, 1991; Babadopulos, 2014). Essas variáveis são de natureza diferente e acabam, à luz do conhecimento atual, forçando o uso de empirismo (correlação estatística) para o relacionamento entre elas, o que dá origem às chamadas Funções de Transferência (FTs), mesmo para os métodos considerados mecanísticos.

Finalmente, é importante citar outros cuidados com a interpretação de resultados de caracterização e de simulação de fadiga. Um deles é em relação ao sentido de propagação das trincas no material testado em laboratório e no material em campo, que podem diferir. Os métodos europeus (EU, 2018), independente da geometria, recomendam a obtenção de amostras de placas compactadas de maneira que o sentido de carregamento no CP corresponda ao sentido de carregamento que ocorreria se a placa inteira fosse carregada. Trata-se de uma preocupação com possível comportamento anisotrópico das misturas asfálticas, que se sabe ter efeito de diferenças da ordem de 15% quanto ao módulo (Di Benedetto, Sauzéat e Clec'h, 2016) e tem potencial para efeito ainda mais importante quanto à resistência à fadiga. Nos modelos de dano (Underwood, Baek e Kim, 2012; AASHTO, 2020) aqui adotados, considerou-se comportamento isotrópico para todos os materiais do pavimento, incluindo efeito isotrópico do dano.

3. MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO DE FADIGA DA MISTURA ASFÁLTICA

3.1. Ensaio de fadiga por tração-compressão

As amostras empregadas no ensaio devem ser moldadas no compactador giratório Superpave (DNIT, 2018b). Precisam apresentar geometria cilíndrica, com topos e bases serrados, atingindo assim 130 mm de altura e 100 mm de diâmetro. Deve-se adotar um Vv de 4% (± 0,4%) e uma temperatura de 19°C para a execução dos ensaios. Após a preparação das amostras deve-se colar os *targets* e os *endplates* (Figura 2 – passos 1, 2 e 3). A colagem dos targets é feita em um acessório/gabarito específico para esta finalidade, sendo que o mesmo parte integrante da prensa usada para realizar o ensaio. Nesta etapa usa-se adesivo epóxi de baixa fluidez (Figura 2). Em seguida as amostras estão aptas a serem montadas na prensa e ensaiadas (Figura 2 – passos 4 e 5). Após a acoplagem da amostra na prensa, para garantir que o ensaio seja realizado com todo o conjunto solidarizado, deve-se fazer um teste de sinal. Para a caracterização do dano segundo o modelo S-VECD, é necessário conhecer o comportamento viscoelástico linear da mistura asfáltica previamente à realização do ensaio de fadiga. Para tal, deve-se realizar, em outro conjunto de amostras, o ensaio de $|E^*|$ (DNIT, 2019).

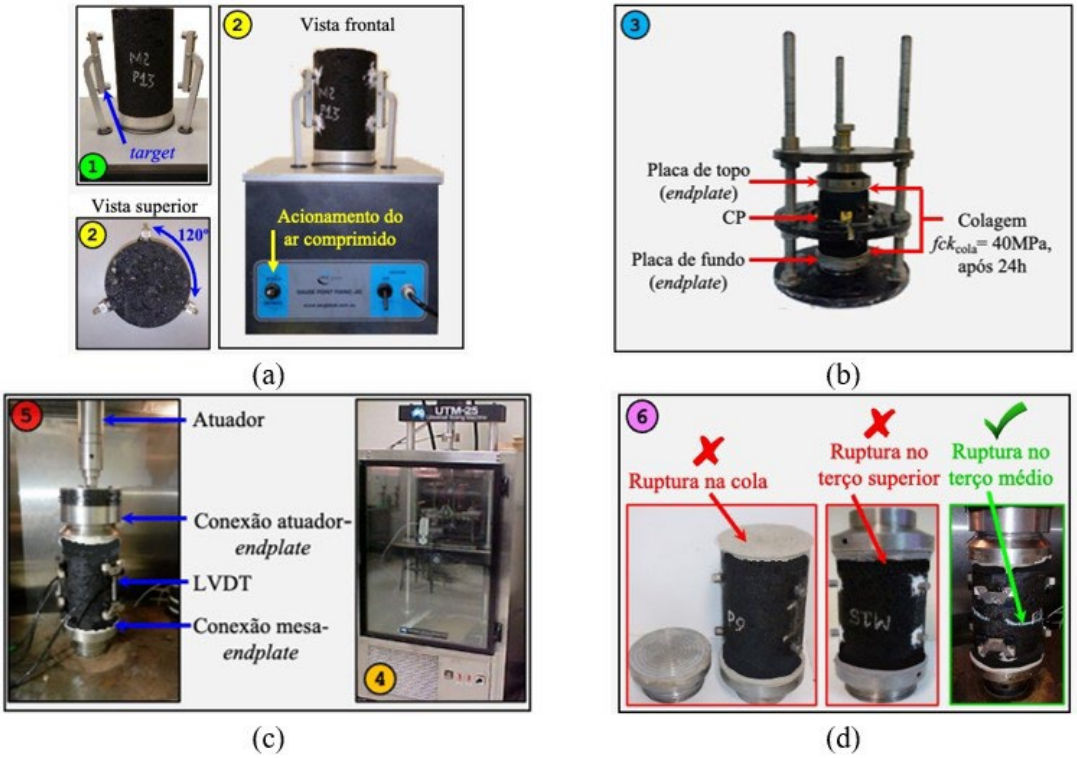


Figura 2. Preparação (a), posicionamento (b e c) e possibilidades de ruptura da amostra no ensaio de fadiga por tração-compressão (d).

O ensaio por tração-compressão preconiza a execução, na mesma amostra cilíndrica do ensaio de fadiga, de uma etapa denominada de *fingerprint*, antes da realização do ensaio propriamente dito. É uma espécie de ensaio de $|E^*|$ resumido, realizado apenas na temperatura e na frequência do ensaio de fadiga (10Hz), porém com a aplicação de poucos ciclos de carregamento de tração-compressão (a mesma do ensaio de fadiga), com o objetivo de situar, em termos de rigidez, o CP do ensaio de fadiga em comparação à média esperada para a mistura com a qual foi fabricado aquele CP. Para ter maiores detalhes sobre a rigidez de misturas asfálticas, recomenda-se a leitura de Specht et al. (2017). O referido trabalho traz a temática rigidez, sublinhando como essa característica é abordada no Brasil e no exterior.

Diferentemente do ensaio de $|E^*|$, o *fingerprint* é realizado com o CP submetido às mesmas condições do ensaio de fadiga (temperatura do ensaio de fadiga, carregamento de tração-compressão, e submetido à colagem de *targets* e *endplates*), sublinhando-se que o carregamento é de tração-compressão, diferentemente do carregamento de compressão *haversine* utilizado no ensaio de $|E^*|$. Neste procedimento é determinado, para cada CP testado, qual o movimento de pistão da prensa (controle no atuador, do inglês *controlled crosshead*) é requerido para se aplicar a amplitude de deformação axial desejada na amostra (medida pelos LVDTs). Os corpos-de-prova devem ser extraídos e serrados de CPs maiores (150 mm de diâmetro e um mínimo de 180 mm de altura) moldados no compactador giratório Superpave. Se isso não for possível, pelo menos a serragem das

extremidades superior e inferior se faz necessária, para evitar efeitos do excesso de vazios nessas zonas dos CPs compactados em laboratório.

Em seguida, o ensaio de fadiga é iniciado, com o movimento de pistão determinado para uma dada amplitude de deformação visada no CP, até a ruptura. São ensaiados 9 CPs por mistura, sendo que cada conjunto de 3 CPs é submetido a um valor específico de deformação axial alvo. Os autores normalmente adotam os valores de 200, 350 e 500 microstrains de amplitude de deformação axial alvo. Oliveira (2019) apresenta um passo a passo detalhado da preparação e execução do ensaio de fadiga por tração-compressão.

3.2. Tratamento de dados com modelo S-VECD do ensaio de fadiga por tração-compressão e critério de ruptura

A etapa de tratamento de dados do ensaio de fadiga por tração-compressão é feita à luz do modelo S-VECD, derivado da teoria do Dano Contínuo Viscoelástico Linear (VECD) (Park, Kim e Schapery, 1996). Vale destacar que optar pelo ensaio de tração-compressão não significa necessariamente escolher também o modelo de tratamento de dados citado. Ambos, modelo e teoria, são apresentados de forma resumida nas próximas seções, sendo que mais detalhes constam em Babadopulos (2014), Nascimento (2015), Almeida (2019), Oliveira (2019) e Santos, Soares e Babadopulos (2020).

Após a finalização do ensaio de fadiga, estarão disponíveis dados das variáveis monitoradas ao longo do tempo de sua execução. Esses dados, sem tratamento, não permitem a avaliação da vida de fadiga da mistura ensaiada. Os mesmos devem ser tratados, primeiro para a determinação das amplitudes e fases dos sinais de carga e deslocamento e, em seguida, utilizando-se a metodologia S-VECD, discutida adiante. Para tratar o grande volume de dados resultante do ensaio, a equipe do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC desenvolveu uma rotina no *software* Matlab.

Deve-se quantificar, ao longo do ensaio, a integridade (C) e a variável interna de estado de dano (S) para a posterior obtenção da curva $C\ vs\ S$. Para quantificar o parâmetro S, emprega-se a Equação 2. Este parâmetro deriva da Teoria do Potencial de Trabalho de Schapery (Park, Kim e Schapery, 1996) e da escolha particular de uma equação para a evolução do dano. Recomenda-se a leitura de Almeida (2019) para um bom entendimento sobre o parâmetro S, que funciona como uma "contagem de dano" (ou de outras mudanças microestruturais reunidas para o S-VECD em apenas uma variável interna de estado) a ser utilizada para o material analisado. Esta variável tem inclusive unidades diferentes em função do valor de α e não deve ser comparada entre diferentes misturas.

$$S(t) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{1}{2}(\varepsilon^R)_i^2 (C_{i-1} - C_i)\right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (2)$$

Onde: $S(t)$ = variável interna de estado de dano no instante de tempo igual a t; N = número de ciclos do ensaio; $(\varepsilon^R)_i^2$ = quadrado da pseudodeformação no ciclo i; $C_{i-1} - C_i$ = diferença da integridade do material entre os ciclos $i-1$ e i; α = taxa de evolução do dano; $t_i - t_{i-1}$ = intervalo de tempo entre os ciclos i e $i-1$.

Para ajuste da curva experimental, faz-se uso da equação $C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}}$. A curva $C\ vs\ S$ é considerada uma característica intrínseca de cada mistura, independente da temperatura e do modo de carregamento (Daniel e Kim, 2002), de maneira que a consideração da mesma é adequada para simulação de condições diferentes das ensaiadas. Embora a referida curva descreva a evolução do dano em cada mistura testada, analisá-la isoladamente não permite inferir sobre a susceptibilidade à fadiga, portanto, não possibilita ainda a avaliação do desempenho em campo. Para suprir essas necessidades, é necessária a adoção de um critério de ruptura/falha para uso associado com a curva $C\ vs\ S$. Tal critério pode assumir diversas formas, sendo a mais comumente adotada a baseada na taxa média de liberação de pseudo-energia (G^R) (Figura 3a), proposto por Sabouri e Kim (2014). A Figura 3b mostra o referido critério de ruptura ($G^R\ vs\ N_f$), representado pela envoltória de ruptura (curva azul) que, por sua vez, é obtida pela união dos pontos/momentos das falhas das curvas pretas (curvas experimentais de diferentes ensaios). Em outras palavras, a envoltória de ruptura representa todos os pontos em que $N = N_f$ para ensaios em diferentes condições de carregamento. A referida envoltória determina o limite superior da taxa média de pseudo-energia liberada por ciclo que a mistura suporta, sendo, portanto, uma característica do material. Assim, esse pode ser utilizado como critério de falha na simulação de solicitações diferentes daquela em que a curva foi obtida. É possível demonstrar que, para amplitudes de deformação constantes, esse critério é equivalente ao de uma amplitude de tensão média, o que facilita a sua interpretação física.

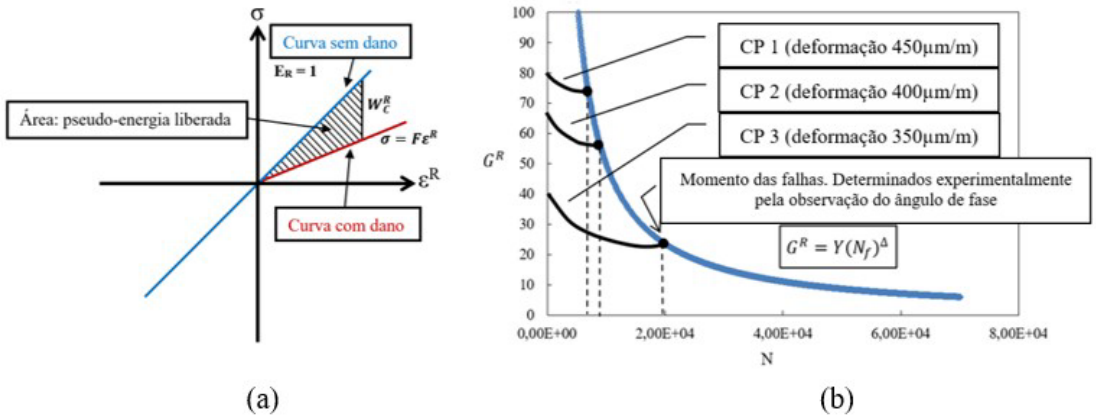


Figura 3. Ilustrações detalhando o critério de ruptura adotado no presente trabalho. (a) Representação gráfica da pseudo-energia liberada [adaptada de Zhang et al., 2013]; (b) Critério de ruptura ($G^R\ vs\ N_f$).

A curva $G^R\ vs\ N_f$ é obtida durante no tratamento de dados posterior à realização do ensaio de fadiga, podendo ser ajustada pela equação $G^R = Y(N_f)^{\Delta}$. Os parâmetros Y e Δ são constantes de regressão que ajustam os valores de $G^R\ vs\ N_f$ obtidos do ensaio de fadiga por tração-compressão para diferentes amplitudes de deformação. Para que um CP chegue à ruptura é necessário que este libere a taxa média de pseudo-energia (G^R) necessária à ruptura. Logo, dispor de uma menor velocidade (taxa) de liberação de

pseudo-energia é fator determinante para que uma mistura tenha uma menor susceptibilidade à fadiga. Destaca-se que o parâmetro G^R pode ser utilizado como critério na caracterização da fadiga de misturas que tiveram ensaios conduzidos em diferentes temperaturas, frequências de carregamento e modos de controle de ensaios (Sabouri e Kim, 2014). Almeida (2019) detalhou todas as equações que devem ser utilizadas na obtenção dos parâmetros necessários para as curvas $C\ vs\ S$ e $G^R\ vs\ N_f$.

De posse dos parâmetros das curvas $C\ vs\ S$ e $G^R\ vs\ N_f$ é então possível avaliar a susceptibilidade à fadiga observando-se a curva de Wöhler simulada em diferentes condições de frequência, temperatura e controle (tensão ou deformação, ou ainda ciclos em amplitudes diferentes), conforme a Seção 3.3. Essa curva de Wöhler pode ser obtida em diferentes condições de carregamento (controle de tensão ou de deformação, diferentes temperaturas e frequências etc.) e corresponde à simulação de fadiga a nível de material utilizando os resultados da caracterização mecânica. Para simulação do trincamento a nível de estrutura (em pavimentos asfálticos), pode ser usada análise estrutural combinada com as propriedades de dano do material da camada de revestimento e com Funções de Transferência devidamente calibradas. Neste trabalho, para a simulação a nível de estrutura, foi adotada a calibração de Santos, Soares e Babadopulos (2020).

3.3. Avaliação da susceptibilidade à fadiga de misturas asfálticas com simulação a nível de material

A curva de Wöhler é uma maneira tradicional de se representar a vida de fadiga de materiais, relacionando valores de níveis de tensão ou de deformação com o número de ciclos de carregamento (*Nf*). Deve-se escolher uma temperatura e uma frequência de referência para construir esta curva. No Brasil, é comum a utilização de 25°C e 10 Hz, já na Europa empregam-se os valores de 10°C ou 15°C e 10 Hz. Logo, os resultados expostos pela referida curva só representam o comportamento das misturas nesta condição particular. Fez-se uso das Equações 3 a 7 descritas em Nascimento (2016) *apud* Oliveira (2019) para simular o número de ciclos até a falha (N_f) (curva de Wöhler).

$$N_f = \left(\frac{\delta}{Y\left(\frac{C_{12}}{p}+1\right)}\right)^{\frac{1}{\Delta+1-\frac{C_{12}}{p}}} \tag{3}$$

$$\delta = \frac{1}{2}(\varepsilon^R)^2 C_{11}\left(\frac{p(C_{11}C_{12})^{\alpha}\left(\varepsilon_{TA}^R\right)^{2\alpha}K_1}{{f_R}^{2^{\alpha}}}\right)^{\frac{C_{12}}{p}} \tag{4}$$

$$\varepsilon_{TA}^R = \frac{1}{E_R}\frac{\beta+1}{2}\left[\left(\varepsilon_{0,pp}\right)_i\left|E^*\right|_{LVE}\right] \tag{5}$$

$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1 \tag{6}$$

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R}\int_0^{\xi} E(\xi-\tau)\frac{d\varepsilon}{d\tau}d\tau \tag{7}$$

Onde: C_{11} e C_{12} = coeficientes da curva $C\ vs\ S$; Y e Δ = coeficientes do critério de ruptura $G^R\ vs\ N_f$; N_f = número de ciclos até a falha; ε^R = amplitude da pseudodeformação; α = taxa de evolução do dano; f_{R} = frequência reduzida; $\varepsilon_{0,pp}$ = amplitude de deformação pico a pico; β = parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração; $\left|E^*\right|_{LVE}$ = módulo dinâmico viscoelástico linear (sem dano) nas condições de temperatura e frequência do ensaio de fadiga; E_R = módulo de referência, ξ = tempo reduzido, τ = variável de integração e E = módulo de relaxação. O parâmetro relacionado à taxa de evolução de dano (α) é calculado a partir das propriedades viscoelásticas lineares do material ($\alpha = 1 + \frac{1}{m}$, onde m indica o máximo valor da derivada do módulo de relaxação em relação ao tempo, em escala log-log), sugerindo-se que materiais com menor capacidade de relaxação devem evoluir em danificação mais rapidamente do que materiais com maior capacidade de relaxação.

Nas análises, deve-se adotar ainda um valor para β que quantifica a duração do tempo de esforço de tração no ciclo de carregamento (β varia de -1 até +1, respectivamente, para solicitação somente de compressão e para solicitação somente de tração). Normalmente, considera-se $\beta = -0{,}08$, valor médio encontrado nos testes desenvolvidos por Nascimento (2015). Na prática, a adoção deste β indica que o tempo ao qual a amostra é submetida à compressão durante a execução do ensaio é ligeiramente superior ao tempo de tração. Caso esses tempos fossem iguais, deveria ser adotado o valor de 0 para β. Recomenda-se a leitura de Santos, Soares e Babadopulos (2020) para maior detalhamento sobre o parâmetro β. Segundo Lemaitre e Desmorat (2005), microfissuras são abertas sob tração e são fechadas sob compressão, ou seja, o dano se manifesta quando existir esforços de tração, algo que também é adotado no modelo S-VECD (Underwood, Baek e Kim, 2012).

3.4. Avaliação da susceptibilidade à fadiga de pavimentos asfálticos com simulação a nível de estrutura

A fadiga de misturas se manifesta em campo na forma de trincamento, sendo possível quantificá-la pela observação do percentual de área superficial trincada do revestimento (%AT). Esse parâmetro deve ser simulado computacionalmente para modelar a susceptibilidade à fadiga de pavimentos reais. Para isso é necessário relacionar informações mecanísticas (simulação de dano nos materiais) com a observação de campo.

Para um maior detalhamento dos tópicos discutidos neste item, recomenda-se a leitura de Nascimento (2015), Fritzen (2016), Santiago, Silva e Soares (2018) e Santiago, Babadopulos e Soares, 2020.

4. EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO EM MATERIAIS E EM PAVIMENTOS

Para exemplificar a aplicação do processo de caracterização de dano a partir do ensaio de fadiga por tração-compressão, investiga-se a seguir o comportamento de duas misturas asfálticas (M1 e M2). Estas foram submetidas ao protocolo de ensaio descrito no item 3.1 deste artigo. Os dados oriundos dos ensaios de fadiga de M1 e M2 foram tratados de acordo com as explicações presentes nos itens anteriores, 3.2 e 3.3.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros das referidas misturas: C_1 e C_2 (equação WLF – Williams-Landel-Ferry), C_{11} e C_{12} (ajuste da curva $C\ vs\ S$), α (taxa de evolução do dano), $|E^*|_{LVE}$ (rigidez sem dano e nas condições de temperatura e frequência do ensaio de fadiga por tração-compressão), Y e Δ (parâmetros da curva $G^R vs\ N_f$). A mesma tabela apresenta ainda os coeficientes da função sigmoidal. Adotou-se $\beta = -0{,}08$. A tabela descreve ainda a estrutura de pavimento usada nas simulações do trincamento de campo, enquanto as Figura 4a e 4b trazem as curvas $C\ vs\ S$ e $G^R vs\ N_f$, respectivamente, para M1 e M2.

Tabela 1: Dados das misturas investigadas e estrutura dos trechos simulados

Características das misturas (temperatura de referência = 20°C)								
	WLF		$C\ vs\ S$				$G^R vs\ N_f$	
Misturas	C_1	C_2	C_{11}	C_{12}	α	$\|E^*\|_{LVE}$ (kPa)	Y	Δ
M1	12,4	98,1	2,33E-04	7,18E-01	2,94	9,42E+06	1,09E+06	-1,214
M2	24,9	194,4	8,27E-05	8,07E-01	2,89	1,10E+07	5,06E+06	-1,360

Coeficientes da função sigmoidal, |E*| em MPa				
	a	b	d	g
M1	1,08	3,34	1,42	0,664
M2	1,12	3,29	1,43	0,672

Características adotadas para a geometria do pavimento, os módulos das camadas granulares e o coeficiente de Poisson dos materiais			
Camada	Espessura (cm)	Módulo de elasticidade (MPa)	Coeficiente de Poisson
Revestimento	8	-	0,30
Base	15	400	0,35
Sub-base	15	204	0,35
Subleito	-	150	0,40

Os materiais adotados nas subcamadas, são amostras de materiais empregados em rodovias reais, do estado onde a pesquisa foi desenvolvida. A rigidez da camada de base, por exemplo, representa bem estes pavimentos, sobretudo aqueles com estruturas mais robustas, onde nota-se um frequente emprego de brita nesta camada. As misturas M1 e M2 foram escolhidas dentre as misturas disponíveis em Santiago (2017), que apresentariam eficientes resistências à fadiga.

Foram analisadas as susceptibilidades à fadiga de M1 e M2 a nível de material pela avaliação de suas curvas de Wöhler (Figura 4c) a 20°C e 10 Hz. Em seguida, utilizou-se o *software* de dimensionamento de pavimentos asfálticos CAP3D-D para simular do %AT (Figura 4d) de dois pavimentos P1 e P2, de mesma geometria, porém variando a mistura do revestimento, respectivamente, M1 e M2. O referido *software* é a evolução do programa de análise estrutural CAP3D (Holanda et al., 2006) e traduz o procedimento de análise resumido na Seção 3.4 com a calibração apresentada em Santos, Soares e Babadopulos (2020).

O exemplo apresentado neste artigo fez uso de uma única temperatura pois, dessa maneira, fica facilitada a percepção e a sensibilidade sobre a análise proposta. Tanto as variações de temperatura quanto as de velocidade do tráfego são fatores relevantes que afetam o desempenho do pavimento. O leitor é referido a Santos, Soares e Babadopulos

(2020) e Lucas (2021) para uma discussão sobre o impacto destas duas variáveis no dimensionamento. Todavia, o intuito do presente trabalho foi discutir conceitos que se relacionam a fadiga de misturas de uma forma aprofundada sem, contudo, considerar estas duas variáveis específicas, uma vez que as mesmas complexificariam ainda mais o exemplo de utilização escolhido. É importante notar que os autores acreditam que temperatura e velocidade de tráfego podem e devem ser consideradas em análises e dimensionamentos.

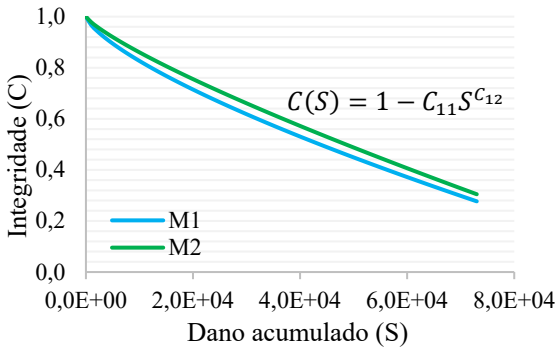
Nas simulações, adotou-se um tráfego correspondente a $N = 1{,}9 \times 10^7$ (*United States Army Corps of Engineers* – USACE) e um período de 120 meses, sendo usado o valor médio de temperatura de Fortaleza-CE (27,2°C), constante ao longo do tempo. Adotou-se a velocidade dos veículos igual a 7,8 km/h, pois, conforme a equação de Brown (1973) (Equação 8), esta velocidade associada à estrutura do pavimento proposta equivale a uma frequência de carregamento na fibra inferior do revestimento igual a 10 Hz. A frequência é considerada o inverso do tempo. Isso permitirá traçar paralelos entre a simulação a nível de material e a simulação a nível de pavimento. Considerou-se ainda um modelo de eixo padrão simples de roda dupla (80 kN), cada roda com raio de 0,108 m.

$$log\, t = 0{,}5y - 0{,}2 - 0{,}94\, log\, v \tag{8}$$

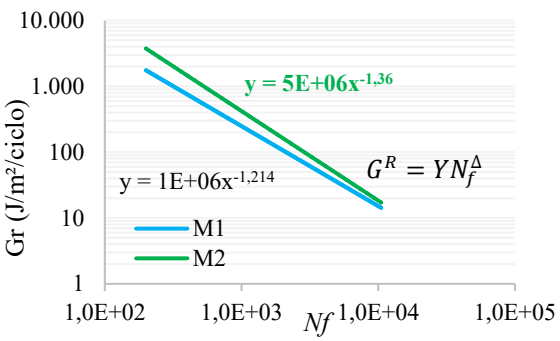
Onde: t = inverso da frequência em Hz (s); y = profundidade do pavimento (m); v = velocidade dos veículos (km/h).

Das Figura 4a (curva característica de dano) e 4b (envoltória de ruptura), tem-se que M2 posicionou-se acima de M1, o que não significa necessariamente desempenho superior à fadiga, entretanto, para se delimitar conclusões acerca de suas susceptibilidades à fadiga é necessário considerar outras variáveis, tais como, seus valores de rigidezes e suas taxas de evolução do dano (α), o que é feito nas simulações a nível de material. Quando se observam os valores das amplitudes de deformação para um dado N_f de M2 na curva de Wöhler (Figura 4c), percebe-se que esses são menores do que os valores de M1, indicando que M1 tem maior resistência à fadiga.

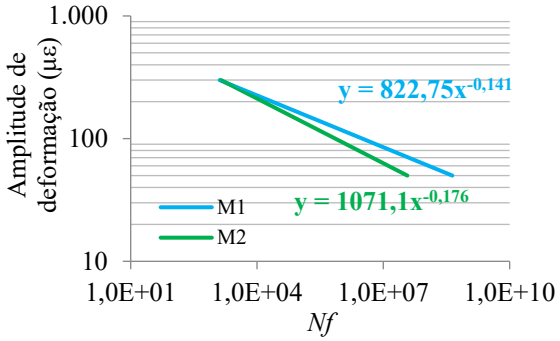
Para facilitar a visualização das diferentes susceptibilidades à fadiga das misturas avaliadas, apresentam-se alguns exemplos numéricos: escolheram-se três valores de amplitude de deformação (y nas equações da Figura 4c), quais sejam: 150, 250 e 350 μm/m (acredita-se que o primeiro seja próximo dos valores observados em campo para pavimentos nacionais) e em seguida se calculou os valores correspondentes de N_f (x nas equações da Figura 4c) para ambas as misturas. Na primeira condição (150 μm/m), os valores de N_f de M1 e M2 são de, respectivamente, $1{,}7 \times 10^5$ e $0{,}7 \times 10^5$ (M1 é 143% mais resistente à fadiga do que M2).



(a) Curvas C vs S

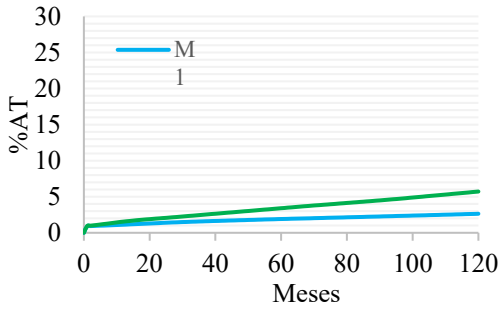


(b) Curvas G^R vs N_f



T = 20ºC e f = 10Hz

(c) Curvas de Wöhler



T = 27,2ºC (temperatura média de Fortaleza)
V = 7,8km/h (equivalente a f = 10Hz)
Estrutura = ver Tabela 1

(d) Simulação da evolução dos %AT

Figura 4. Características de fadiga das misturas e suas simulações.

Por sua vez, para 250 μm/m, os valores de N_f de M1 e M2 são, respectivamente, $4{,}6 \times 10^3$ e $3{,}9 \times 10^3$ (M1 é 18% mais resistente à fadiga do que M2). Por fim, para 350 μm/m, os valores de N_f de M1 e M2 são, respectivamente, $4{,}3 \times 10^2$ e $5{,}8 \times 10^2$ (M2 é 26% mais resistente à fadiga do que M1). Portanto, assim como observado na Figura 4c, é possível perceber que M1 apresenta-se mais resistente à fadiga para valores menores de amplitude de deformação. Essa lógica se inverte quando consideramos valores mais elevados do mesmo parâmetro. Esse dado deve ser relativizado, pois o mesmo foi obtido pela consideração da curva de Wöhler das misturas, que, por sua vez, foi construída a partir de valores únicos de temperatura e frequência (20°C e 10 Hz).

Comportamento análogo é notado ao avaliar a evolução da previsão do %AT (Figura 4d), pois M2 (5,7% de AT ao final do período de simulação), mostrou-se aproximadamente 117% menos resistente à fadiga do que M1 (2,6% de AT ao final do período de simulação). Nas simulações faz-se uso de características de carga próximas das experimentadas pelos pavimentos em campo, equivalentes aos valores menores de amplitudes de deformação testados.

É importante pontuar que conclusões obtidas em ambiente controlado (laboratório) e/ou em simulações computacionais devem ser sempre relativizadas, uma vez que em

campo há variáveis que nem sempre são contempladas nas análises mencionadas, tais como: veículos diversos trafegando em diferentes velocidades e o envelhecimento do ligante asfáltico presente no revestimento.

Outro parâmetro que pode ser usado para comparar comportamentos quanto à fadiga é o ε_6 comumente adotado em análises com a norma europeia (EU, 2018). Corresponde ao valor de amplitude de deformação que leva à ruptura em 10^6 ciclos e também é utilizado em lógicas de dimensionamento. Nesta metodologia, compara-se a amplitude de deformação que levará a mistura ao rompimento em 10^6 ciclos. Conclui-se então, que é mais resistente aquela mistura que suportar uma maior amplitude de deformação.

Sublinha-se uma diferença de definição ao se comparar resultados entre métodos norte-americanos (adotado neste trabalho) com o de métodos europeus: para os métodos europeus "amplitude" corresponde à magnitude do sinal senoidal, enquanto para os métodos norte-americanos "amplitude" corresponde ao valor de "pico-a-pico" (altura entre o pico e o vale do sinal senoidal), sendo, portanto, o dobro do valor numérico do que seria a mesma amplitude de sinal que no método europeu.

O FFM (Fator de Fadiga das Misturas), parâmetro proposto por Nascimento (2015), é numericamente igual à área abaixo da Curva de Wöhler (para 20 ºC e 10 Hz), calculada entre os valores de 100 até 200 microstrains. Esses valores são adotados, pois normalmente são aceitos como comuns de serem observados em rodovias reais. Valores maiores de FFM indicam misturas com resistências à fadiga superiores, logo, por este índice, M1 também se mostrou mais resistente que M2, uma vez que os seus FFMs são 1,63 e 1,50, respectivamente. A diferença relativa calculada utilizando-se este indicador, porém, é menor (cerca de 8%). É importante notar que as rigidezes das misturas são diferentes, o que juntamente com os seus FFMs pode afetar as simulações.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de tornar o ensaio de fadiga por tração-compressão de mais fácil compreensão, fez-se uma explanação de detalhes de ordem prática, da obtenção da curva de dano ($C\ vs\ S$) e do critério de falha (curva $G^R\ vs\ N_f$), bem como do seu emprego para avaliar a susceptibilidade à fadiga a nível de material (curvas de Wöhler) e de estruturas (previsão de desempenho de pavimentos). Como exemplo das metodologias abordadas, avaliou-se a susceptibilidade à fadiga de duas misturas asfálticas (M1 e M2). Além da curva de Wöhler a 20°C e 10 Hz, a previsão de desempenho de dois pavimentos (P1 e P2) revestidos por M1 e M2, respectivamente, foi obtida. As conclusões listadas a seguir foram retiradas.

- Considerando aspectos do ensaio de fadiga por compressão diametral e a sua possível inadequação para representar a fadiga de misturas, recomenda-se a utilização do ensaio de fadiga por tração-compressão para caracterizar este defeito. Sublinha-se que o mesmo, se associado com o modelo S-VECD, é o ensaio disponível que aborda um maior número de variáveis, além de também ser o que requer menor tempo de execução, viabilizando uma caracterização de fadiga em laboratório para uso na prática do dimensionamento. Enquanto para a caracterização de uma

mistura com o ensaio de compressão diametral usando a norma nacional pode durar mais de um mês, com o ensaio explicado neste artigo esse tempo é da ordem de menos de uma semana.

- As simulações da vida de fadiga das misturas e dos pavimentos apresentaram o mesmo ranqueamento, com diferenças relativas na mesma ordem de grandeza. Os usos dos índices conhecidos como ε_6 e como FFM também indicaram ranqueamento semelhante, mas com valores numéricos menores de diferença relativa entre as misturas. Reitera-se que analisar a susceptibilidade à fadiga de misturas sem considerar as variáveis observadas em campo (e.g. estrutura do pavimento, temperatura ambiente, diferentes velocidades/frequências dos veículos) não é a metodologia ideal, pois as simplificações mencionadas podem conduzir a resultados inconsistentes.

Os autores delimitaram como sugestões para trabalhos futuros, o seguinte item: replicar as análises propostas no presente artigo, porém visando abordar um número maior de cenários e/ou materiais.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Petrobras, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e Programa da Universidade Federal do Ceará (UFC) para Formação de Recursos Humanos em Engenharia e Ciências do Petróleo e Gás Natural – PRH-31.1/ANP/FINEP.

REFERÊNCIAS

AASHTO (2020) AASHTO TP 107: Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests. Washington: AASHTO.

Almeida, F.J.P. (2019) *Modelagem Computacional de Misturas Asfálticas com Utilização do Método dos Elementos Finitos e da Teoria do Dano Contínuo*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/40405> (acesso em 17/03/2022).

Babadopulos, L.F.A.L. (2014) *A Contribution to Couple Aging to Hot Mix Asphalt (HMA) Mechanical Characterization Under Load-Induced Damage*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/11164> (acesso em 17/03/2022).

Babadopulos, L.F.A.L.; G. Orozco; C. Sauzéat et al. (2019) Reversible phenomena and fatigue damage during cyclic loading and rest periods on bitumen. *International Journal of Fatigue*, v. 124, p. 303-314. DOI: j.ijfatigue.2019.03.008.

Babadopulos, L.F.A.L.; J.B. Soares e V.T.F. Castelo Branco (2015) Interpreting fatigue tests in hot mix asphalt (HMA) using concepts from viscoelasticity and damage mechanics. *Transportes*, v. 23, n. 2, p. 85-94. DOI: 10.14295/transportes.v23i2.898.

Bernucci, L.B.; L.M.G. Motta; J.A.P. Ceratti et al. (2010) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobrás ABEDA.

Boeira, F.D.; G. Pinheiro; L.P. Specht et al. (2018) Projeto e implementação de ensaio de fadiga por tração-compressão direta (uniaxial) para avaliação de dano em misturas asfálticas. *Matéria*, v. 23, n. 3, p. e12148. DOI: 10.1590/s1517-707620180003.0482.

Brown, S. (1973) Determination of Young's modulus for bituminous materials in pavement design. In Highway Research Board (org.) *Soil Mechanics: Design: 6 Reports Prepared for the 52nd Annual Meeting*. Washington: Highway Research Board, p. 38-49.

CNT (2021) *Pesquisa CNT de Rodovias 2018: Relatório Gerencial*. Brasília: SENAT.

Daniel, J.S. e Y.R. Kim (2002) Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic continuum damage model. *Electronic Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 71, p. 619-50.

Di Benedetto, H.; C. De La Roche; H. Baaj et al. (2004) Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, v. 37, n. 3, p. 202-216. DOI: 10.1007/BF02481620.

Di Benedetto, H.; C. Sauzéat e P. Clec'h (2016) Anisotropy of bituminous mixture in the linear viscoelastic domain. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, v. 20, n. 3, p. 281-97. DOI: 10.1007/s11043-016-9305-0.

Di Benedetto, H.; M.N. Partl; L. Francken et al. (2001) Stiffness testing for bituminous mixtures. *Materials and Structures*, v. 34, n. 2, p. 66-70. DOI: 10.1007/BF02481553.

DNIT (2018a) DNIT M.E. 183: Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada. Rio de Janeiro: DNIT.

DNIT (2018b) DNIT P.R.O. 178: Preparação de Corpos de Prova para Ensaios Mecânicos Usando o Compactador Giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. Rio de Janeiro: DNIT.

DNIT (2019) DNIT M.E. 416: Determinação do Modulo Dinâmico. Rio de Janeiro: DNIT.

EU (2018) EN 12697-24: Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Resistance to Fatigue. Bruxelas: EU.

Fritzen, M.A. (2016) *Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão de Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/391-2016/4707-marcos-antonio-fritzen> (acesso em 17/03/2022).

Goodrich, J.L. (1991) Asphalt binder rheology, asphalt concrete rheology and asphalt concrete mix properties. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 60, p. 80-120.

Hill, R. (1963) Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 11, n. 5, p. 357-372. DOI: 10.1016/0022-5096(63)90036-X.

Holanda, A.S.; E. Parente Jr.; T.D.P. Araújo et al. (2006) Finite element modeling of flexible pavements. In *Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/1380> (acesso em 17/03/2022).

Kachanov, L.M. (1958) Time to rupture in creep condition. In *Izviestia Akademii Nauk SSSR*. URSS: Academia de Ciências da URSS, p. 26-31.

Lemaitre, J. (1996) *A Course on Damage Mechanics* (2a ed.). Berlim: Springer.

Lemaitre, J. e R. Desmorat (2005) *Engineering*, *Damage Mechanics*, *Ductile*, *Creep*, *Fatigue and Brittle Failures*. Berlim: Springer.

Lucas, J.L.O. Jr. (2021) *Adesividade Agregado-Ligante: Efeito no Comportamento de Misturas Asfálticas e na Previsão de Desempenho de Pavimento*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/56968> (acesso em 17/03/2022).

Mangiafico, S.; C. Sauzéat; H. Di Benedetto et al. (2015) Quantification of biasing effects during fatigue tests on asphalt mixes: nonlinearity, self-heating and thixotropy. *Road Materials and Pavement Design*, v. 16, n. Suppl. 2, p. 73-99. DOI: 10.1080/14680629.2015.1077000.

Medina, J. e L.M.G. Motta (2015) *Mecânica dos Pavimentos* (3a ed.). Rio de Janeiro: Editora Interciência.

Nascimento, L.A.H. (2015) *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. Tese (PhD). Universidade Estadual da Carolina do Norte, Raleigh, NC. Disponível em: <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/10651> (acesso em 17/03/2022).

Oliveira, A.H. (2014) *Avaliação do Potencial Antioxidante do Líquido da Castanha de Caju (LCC) para Materiais Asfálticos Através de Diferentes Métodos de Envelhecimento*. Tese (mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/11174> (acesso em 17/03/2022).

Oliveira, J.A. (2013) *Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e em Campo*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

Oliveira, J.A. (2019) *Avaliação do Impacto da Metodologia FAD-CI de Seleção Granulométrica na Vida de Fadiga de Misturas Asfálticas*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/56908> (acesso em 17/03/2022).

Oliveira, J.A.; J.B. Soares e L.A.H. Nascimento (2021) Avaliação de parâmetros FAD-CI e seus impactos na vida de fadiga de misturas asfálticas. *Transportes*, v. 29, n. 3, p. 1-13. DOI: 10.14295/transportes.v29i4.2017.

Park, S.W.; Y.R. Kim e R.A. Schapery (1996) Viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete. *Mechanics of Materials*, v. 24, n. 4, p. 241-55. DOI: 10.1016/S0167-6636(96)00042-7.

Reddy, J.N. e D.K. Gartling (2010) *The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics* (3a ed.). Boca Raton: CRC Press. DOI: 10.1201/9781439882573.

Sabouri, M.A. e Y.R. Kim (2014) Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, v. 2447, n. 1, p. 117-125. DOI: 10.3141/2447-13.

Santiago, L.S. (2017) *Contribuições para o Desenvolvimento de um Método Mecanístico-Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/43902> (acesso em 17/03/2022).

Santiago, L.S.; L.F.A.L. Babadopulos e J.B. Soares (2020) Desenvolvimento de função de transferência para previsão de área trincada em pavimentos asfálticos por meio da simulação do dano por fadiga utilizando modelo S-VECD e análises elásticas. *Transportes*, v. 28, n. 3, p. 121-36. DOI: 10.14295/transportes.v28i3.1900.

Santiago, L.S.; S.A.T. Silva e J.B. Soares (2018) Determinação do dano em pavimentos asfálticos por meio da combinação do modelo S-VECD com análises elásticas. *Transportes*, v. 26, n. 2, p. 31-43. DOI: 10.14295/transportes.v26i2.1446.

Santos, A.B.V.; J.B. Soares e L.F.A.L. Babadopulos (2020) Influência da temperatura e da velocidade de trafego na previsão de área trincada de pavimentos asfálticos. *Transportes*, v. 28, n. 4, p. 53-66. DOI: 10.14295/transportes.v28i4.2394.

Schuster, S.L.; C. Faccin; F. Boeira et al. (2023) Fatigue behaviour of plant produced asphalt mixtures through viscoelastic continuum damage model. *Road Materials and Pavement Design*, v. 24, n. 1, p. 59-85. DOI: 10.1080/14680629.2021.2009011.

Soares, J.B. (2020) Reflexões sobre um programa de pesquisa científica para a infraestrutura viária do Brasil. *Transportes*, v. 28, n. 5, p. 154-168. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2174.

Specht, L.P.; L.F.A.L. Babadopulos; H. Di Benedetto et al. (2017) Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes. *Construction & Building Materials*, v. 149, p. 648-58. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.037.

Underwood, B.S.; C. Baek e Y.R. Kim (2012) Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis. *Transportation Research Record*, v. 2296, n. 1, p. 36-45. DOI: 10.3141/2296-04.

Zhang, J.; M. Sabouri; M.N. Guddati et al. (2013) Development of a failure criterion for asphalt mixtures under fatigue loading. *Road Materials and Pavement Design*, v. 14, n. supl 2, p. 1-15. DOI: 10.1080/14680629.2013.812843.