

DIFERENTES ABORDAGENS DE ANÁLISE E CRITÉRIOS DE RUPTURA APLICADOS À ENSAIOS DE FADIGA E SUA REPERCUSSÃO NO DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

João Victor Staub de Melo

Igor Tiago Buzzi Torres

Luana Schuster

Ramon Mendes Knabben

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

Os ensaios de fadiga em misturas asfálticas, são parte integrante dos procedimentos de caracterização avançada do material e são utilizados para o dimensionamento racional dos pavimentos. Contudo, existem diversos critérios de ruptura e métodos de análise que podem ser utilizados para a obtenção dos modelos de fadiga da mistura. Estes métodos e critérios podem não produzir os mesmos resultados na obtenção da lei de fadiga do material, acarretando em diferentes espessuras de revestimento. Este trabalho apresenta os resultados da influência de diferentes métodos de análise e critérios de ruptura por fadiga no dimensionamento do pavimento flexível. Para o estudo, uma mistura asfáltica foi produzida e submetida ao ensaio de fadiga no aparato a quatro pontos, sobre deformação controlada, frequência de 10 Hz, carregamento sinusoidal e temperatura de 20 °C. A partir dos resultados obtidos, foram aplicadas duas abordagens de análise, a de Wöhler e a da energia dissipada acumulada, e também, três critérios de ruptura, o critério de Pronk & Hopman, o critério da Arizona State University (ASU) e o critério convencional. Os resultados evidenciaram a influência do método (abordagem) de análise e do critério de ruptura no dimensionamento da estrutura do pavimento flexível.

ABSTRACT

Fatigue tests on asphalt mixtures are an integral part of the advanced characterization procedures of the material and are used for the rational design of pavements. However, there are several rupture criteria and methods of analysis that can be used to obtain the fatigue models of the mixture. These methods and criteria may not produce the same results in obtaining the fatigue law of the material, resulting in different surface thicknesses. This work presents the results of the influence of different methods of analysis and fatigue rupture criteria in the design of the flexible pavement. For the study, an asphalt mixture was produced and subjected to the fatigue test in the apparatus at four points, on controlled deformation, frequency of 10 Hz, sinusoidal load and temperature of 20 °C. From the obtained results, two approaches of analysis, of the Wöhler and of the accumulated dissipated energy were applied, as well as three criteria of rupture, the criterion of Pronk & Hopman, the criterion of Arizona State University (ASU) and the conventional criterion. The results evidenced the influence of the method (approach) of analysis and the criterion of rupture in the design of the flexible pavement structure.

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos asfálticos normalmente não apresentam rupturas bruscas e repentinas e sim deteriorações funcionais e estruturais acumuladas no momento em que passam a ser solicitados por cargas dinâmicas e efeitos ambientais. Por conta disto, é interessante estudar as origens destas manifestações patológicas para aperfeiçoar o desempenho mecânico apresentado pela estrutura (Bernucci *et al.*, 2008).

O fenômeno da fadiga é um destes mecanismos de degradação e consiste na solicitação de um determinado material através de cargas cíclicas com baixos níveis de tensão/deformação. No caso de misturas asfálticas, devido ao seu comportamento viscoelástico, a temperatura e frequência de carregamento são parâmetros essenciais que influenciam mecanicamente a resposta que o material apresenta (Khalid, 2000). A deflexão repetida no revestimento asfáltico causada pelas solicitações dinâmicas do tráfego e variações bruscas de temperatura faz com que apareçam tensões de tração na parte inferior do material, acarretando num comprometimento da sua vida útil conforme o número de ciclos de carregamentos avança. Este processo de flexão

alternada gera diferentes estados físico-mecânicos no pavimento, cuja velocidade de nucleação das trincas depende da amplitude e frequência destas deflexões (Melo, 2014).

No dimensionamento mecânico do pavimento, os ensaios de fadiga, permitem obter uma estimativa mais adequada do desempenho do revestimento sob à ação repetida de cargas durante a sua vida útil. Existem diversos ensaios para definir a vida de fadiga em uma mistura asfáltica. A partir da análise dos resultados destes ensaios, é possível a elaboração de modelos representativos do comportamento que o material terá em campo. Pode-se citar como ensaios utilizados para a avaliação da resistência à fadiga: o teste por flexão de 2 pontos, o teste por flexão de 4 pontos, o ensaio uniaxial de tração/compressão e o teste de tração indireta (Zeiyada, 2012).

No que se refere aos métodos de análise e critérios de ruptura empregados nos ensaios de fadiga, assume-se, em grande parte das normativas (AASHTO T321, 2014; EN 12697:24, 2018), a abordagem de Wöhler e o critério convencional. Contudo, este método de análise e critério de ruptura, apesar de serem constantemente empregados na concepção das curvas de fadiga, não fornecem uma descrição detalhada dos mecanismos de degradação do material (Sybilski & Bankowski, 2007). Por conta disto, diversos pesquisadores vêm estudando outros métodos de análise e critérios de ruptura para descrever apropriadamente o comportamento à fadiga das misturas asfálticas.

Este artigo apresenta os resultados de um estudo sobre a influência de diferentes métodos de análise e critérios de ruptura à fadiga de misturas asfálticas no dimensionamento mecânico da estrutura de um pavimento flexível.

2. MÉTODO

Para o desenvolvimento do estudo foi produzida uma mistura asfáltica em laboratório e obtidos dez corpos de provas prismáticos (38,1 x 6,35 x 5,08 cm), destinados a realização de ensaios de fadiga e módulo dinâmico no aparato a quatro pontos. A partir dos dados obtidos nos ensaios de fadiga, foram aplicados sobre os resultados, três diferentes critérios de ruptura, o critério convencional, o critério de Pronk & Hopman e o critério da ASU (Arizona State University). O critério de ruptura convencional define como ponto de falha (N_f) o momento em que o módulo dinâmico do material se reduz em 50% com relação ao seu valor inicial, tomado no centésimo ciclo de carregamento. No critério de Pronk & Hopman é plotada a razão de energia dissipada em função do número de ciclos de carregamento, onde o ponto de falha (N_f) é igual ao número de ciclos necessários para que a razão de energia dissipada se desvie de uma linha reta tangente ao primeiro trecho da curva, como ilustra a Figura 1.

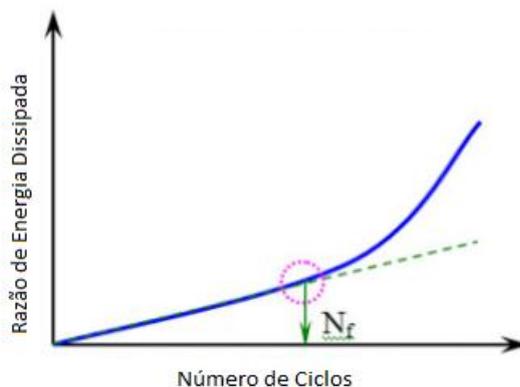


Figura 1: Representação do critério de ruptura de Pronk & Hopman (Souliman *et al.*, 2012).

A razão da energia dissipada é calculada segundo a Equação 1.

$$ER = n \times \frac{w_o}{w_n} = \frac{n [\pi \varepsilon_o \sigma_o \text{sen}(\delta_o)]}{\pi \varepsilon_n \sigma_n \text{sen}(\delta_n)} \quad (1)$$

em que

- ER: razão de energia dissipada no ciclo n;
- n: número de ciclos de carregamento;
- w_n: energia dissipada no ciclo n;
- w_o: energia dissipada inicial (quinquagésimo ciclo);
- ε_o: deformação inicial;
- σ_o: tensão inicial;
- δ_o: ângulo de fase inicial;
- ε_n: deformação para o ciclo n;
- σ_n: tensão para o ciclo n; e
- δ_n: ângulo de fase para o ciclo n.

No critério da ASU, plota-se a razão de degradação da rigidez em função do número de ciclos de carregamento, o ponto de falha (N_f) é definido onde ocorre um pico da curva formada, como demonstra a Figura 2.

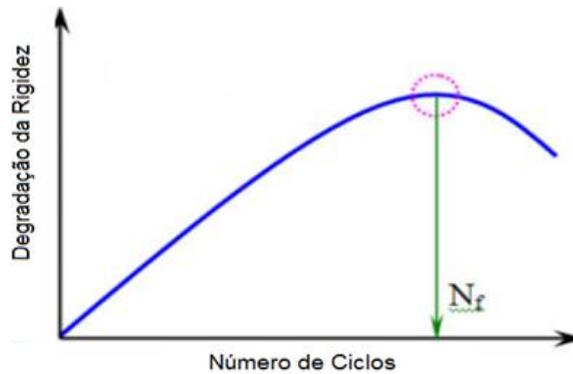


Figura 2: Representação do critério de ruptura da ASU (Souliman *et al.*, 2012).

A razão de degradação da rigidez é calculada segundo a Equação 2.

$$SR = (N_i \times S_i) / S_o \quad (2)$$

em que

- SR: razão de degradação da rigidez no ciclo n;
- N_i: número de ciclos de carregamento no instante i;
- S_i: rigidez à flexão do material no instante i; e
- S_o: rigidez à flexão inicial do material (quinquagésimo ciclo).

Após a aplicação dos diferentes critérios de ruptura, foram obtidas as equações de fadiga por dois métodos de análise (abordagens) diferentes, o método de Wöhler e o método da energia dissipada acumulada. Na abordagem de Wöhler foram aplicados os critérios de ruptura de Pronk & Hopman, da ASU e o convencional. Para a abordagem da energia dissipada acumulada foram aplicados o critério de ruptura convencional e de Pronk & Hopman.

No método de Wöhler, a equação de fadiga foi obtida pela relação entre as deformações de tração e o número de ciclos onde ocorre a ruptura por fadiga. O modelo de fadiga é expresso através da Equação 3.

$$N_f = k_1 (\varepsilon_o)^{-k_2} \quad (3)$$

em que

- N_f: número de ciclos de carregamento até a ruptura;

ϵ_t : amplitude da deformação aplicada; e
 k_1 e k_2 : constantes.

No método da energia dissipada acumulada, a equação de fadiga foi desenvolvida correlacionando a energia dissipada acumulada com o número de ciclos, ambos no momento da ruptura por fadiga. O modelo de fadiga por este método é expresso através da Equação 4.

$$N_f = A(W_{ac})^Z \quad (4)$$

em que W_{ac} : energia dissipada acumulada na ruptura;
 N_f : número de ciclos de carregamento na falha por fadiga; e
 Z e A : constantes.

Na etapa final do trabalho, foi realizado o dimensionamento racional de uma estrutura de um pavimento flexível. O objetivo desta etapa foi evidenciar a influência dos diferentes critérios de ruptura à fadiga no dimensionamento da espessura do revestimento asfáltico, assim como, a influência da abordagem de Wöhler e da abordagem da energia dissipada acumulada. Para tanto, realizou-se uma simulação numérica utilizando o Software ViscoRoute (desenvolvido pelo IFSTTAR/França), que leva em consideração os parâmetros viscoelásticos do revestimento asfáltico. O programa também inclui em seus dados de entrada a velocidade do carregamento e a temperatura da mistura asfáltica. Quanto ao carregamento, foi considerado um eixo simples de roda dupla de 8,2 toneladas na velocidade de 72 km/h. A Figura 3 ilustra os dados de entrada para a modelização da estrutura de pavimento no Software ViscoRoute.

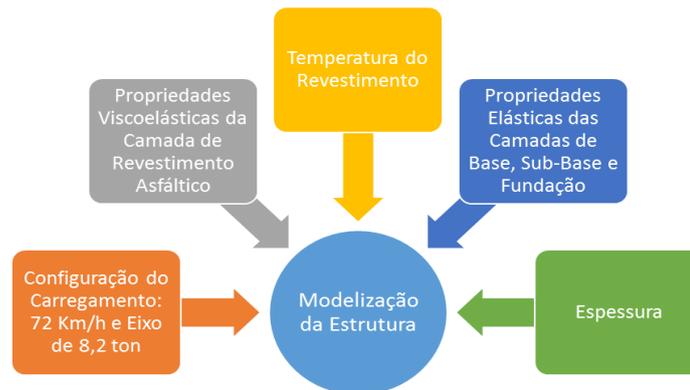


Figura 3: Dados de entrada para modelização da estrutura do pavimento no Software ViscoRoute.

Logo após a modelização do pavimento flexível foi obtido como dado de saída do Software ViscoRoute a deformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico. Com isto, fez-se uso das curvas de fadiga desenvolvidas, para verificar o número de ciclos que representaria a ruptura por fadiga do revestimento asfáltico, sobre diferentes critérios e métodos de análise.

No caso da abordagem de Wöhler, para a estimativa de ruptura do revestimento por fadiga, bastou entrar nas equações de fadiga com a deformação de tração máxima obtida pelo Software ViscoRoute. No caso da abordagem da energia dissipada acumulada, o procedimento de dimensionamento foi realizado de outra forma. Primeiramente, foi adquirida por meio da Equação 5, a energia dissipada inicial ocasionada no revestimento asfáltico pelo eixo simples de roda dupla de 8,2 toneladas na velocidade de 72 km/h. Com a energia dissipada inicial calculada, obteve-se por meio de um modelo matemático de correlação, adquirido através dos

dados dos ensaios laboratoriais de fadiga, a previsão da energia dissipada acumulada no momento da ruptura do revestimento asfáltico. Após este procedimento, fez-se a inserção deste valor calculado de energia dissipada acumulada na curva de fadiga, resultando no número de ciclos de carregamento necessários para a ruptura do revestimento asfáltico.

$$W_i = \pi \varepsilon_o^2 |E^*| \text{sen} \delta_i \quad (5)$$

em que W_i : energia dissipada inicial;
 ε_o : amplitude da deformação inicial (constante);
 $|E^*|$: módulo dinâmico inicial; e
 δ_i : ângulo de fase inicial.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Produção da mistura asfáltica e dos corpos de prova prismáticos

Para a produção da mistura asfáltica, foram utilizados os seguintes materiais: agregados minerais de origem basáltica; cal hidratada CH-1 dolomítica; e, ligante asfáltico convencional (CAP 50-70; Performance Grade 64-22).

A formulação da curva granulométrica seguiu os critérios Superpave para um tamanho nominal máximo de 19 mm. Neste sentido, a curva granulométrica foi constituída de 56,7% de agregado graúdo (passante na # 3/4" e retido na # nº 4), 37,9% de agregado miúdo (passante na # nº 4 e retido na # nº 200) e 5,4% de material pulverulento (passante na # nº 200 e retido no fundo). O material pulverulento foi composto de 3,9% de pó de pedra e 1,5% de cal hidratada. A composição granulométrica é apresentada na Figura 4.

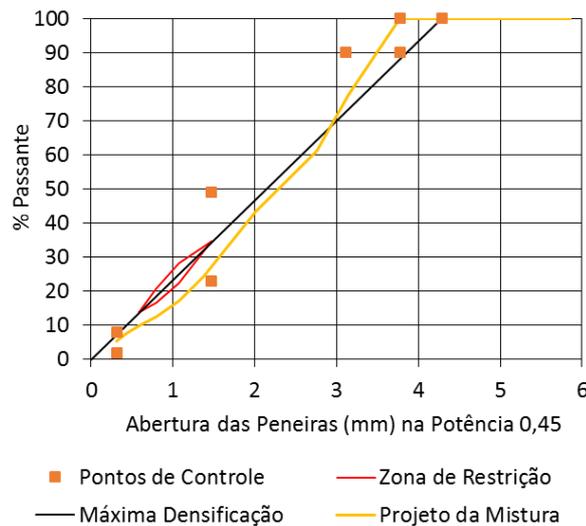


Figura 4: Composição granulométrica da mistura de agregados.

A dosagem da mistura asfáltica foi realizada no compactador giratório segundo a metodologia Superpave, para elevado volume de tráfego ($N_{inicial} = 9$ giros; $N_{projeto} = 125$ giros; $N_{máximo} = 205$ giros). Os procedimentos adotados na dosagem, seguiram as recomendações das normas AASHTO M323 (2013) e AASHTO R 35 (2012). Foram fixados três parâmetros na moldagem: ângulo de compactação de $1,25^\circ$, pressão de compactação de 0,6 MPa e velocidade de giro de 30 rpm. O teor ótimo de ligante asfáltico foi definido como aquele que atendeu aos seguintes critérios: porcentagem de vazios no $N_{inicial} > 11\%$, no $N_{projeto} = 4\%$ e no $N_{máximo} > 2\%$; $VAM \geq 13\%$; RBV entre 65% e 75%; e RPB entre 0,8 e 1,6. Parâmetros definidos segundo a metodologia Superpave para um tamanho nominal máximo de 19 mm e elevado volume de

tráfego. Para validação da dosagem, a mistura asfáltica projetada foi submetida ao ensaio de Lottman modificado (AASHTO T283, 2011).

No que diz respeito aos resultados, o estudo de dosagem conduziu a um teor de ligante asfáltico de 4,35%. Quanto ao ensaio de Lottman modificado, os danos ocasionados pela umidade induzida não proporcionaram redução na resistência à tração maior que 30%.

Após a dosagem da mistura asfáltica, realizou-se a moldagem de placas de mistura asfáltica, destinadas a obtenção dos corpos de prova prismáticos (38,1 cm x 6,35 cm x 5,08 cm). Na compactação das placas foi utilizada a mesa compactadora LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), atual IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux). A compactação das placas seguiu a especificação francesa AFNOR NF P 98-250-2 (1991). Foram moldadas 2 placas de 60 cm x 40 cm x 9 cm, das quais foram obtidos por placa, 5 corpos de prova prismáticos após a serragem, conforme a Figura 5.

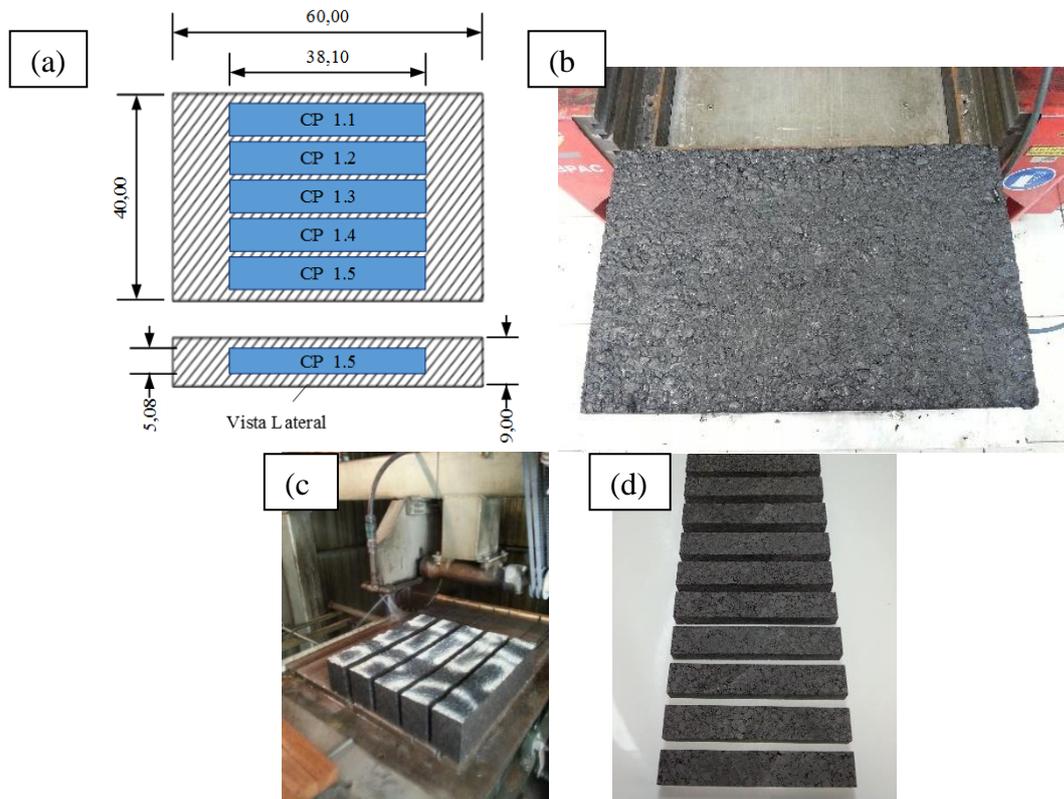


Figura 5: Obtenção dos corpos de prova: (a) plano de corte, (b) placa compactada, (c) serragem da placa e (d) corpos de prova prismáticos.

3.2. Ensaio de resistência à fadiga

Para o ensaio de resistência à fadiga, utilizou-se o equipamento a quatro pontos, seguindo as diretrizes gerais da norma EN 12697-24 (2018). Foram testados um total de seis corpos de prova quanto à fadiga. Os quatro corpos de prova restantes foram usados para determinação do módulo dinâmico da mistura asfáltica, na temperatura de 20 °C e frequência de 10 Hz. Os ensaios de fadiga foram realizados nas seguintes condições: carregamento sinusoidal contínuo; deformação controlada; temperatura de ensaio de 20 °C; frequência de 10 Hz; e, término de ensaio quando atingida a redução de 70% do módulo dinâmico inicial, com módulo inicial

determinado no centésimo ciclo. O término de ensaio foi determinado na redução de 70% do módulo inicial para garantir a aplicação de todos os critérios de ruptura propostos neste estudo. A Tabela 1 apresenta o número de ciclos (N_f) ao qual se atinge o critério de ruptura avaliado e a respectiva redução da rigidez inicial.

Tabela 1: Pontos de ruptura segundo diferentes critérios.

CP	Deformação de Tração ($\times 10^{-6}$)	Critério Convencional		Critério de Pronk & Hopman		Critério da ASU	
		N_f	Redução da Rigidez Inicial (%)	N_f	Redução da Rigidez Inicial (%)	N_f	Redução da Rigidez Inicial (%)
1	150	204386	50,0	93685	35,2	217500	53,9
2	100	1719490	50,0	750855	36,3	1878500	54,3
3	200	63775	50,0	23000	40,2	76500	60,0
4	150	202653	50,0	75568	36,8	220000	57,5
5	200	44220	50,0	16000	37,2	69000	64,4
6	100	1483987	50,0	678393	40,9	1734000	56,9

Verifica-se na Tabela 1, que todos os pontos de ruptura adquiridos pelo critério de Pronk & Hopman são mais conservadores que aqueles adquiridos pelo critério convencional. Em média, o critério de Pronk & Hopman apresenta uma redução de 59,2% no número de ciclos se comparado ao critério convencional. Quanto ao critério da ASU, observa-se que este precisa de um número maior de ciclos para atingir o critério de ruptura, em média 14,9%, quando comparado ao convencional, ou seja, considera que o material asfáltico resiste mais ao fenômeno da fadiga. No que diz respeito à porcentagem de redução do módulo dinâmico inicial nos critérios de ruptura, o critério de Pronk & Hopman apresenta valores menores que 50%, em média 37,8%, enquanto que o critério da ASU, apresenta valores maiores, em média 57,8%.

3.3. Obtenção das equações de fadiga

A partir dos pontos de ruptura adquiridos por meio dos diferentes critérios analisados, construiu-se a equação de fadiga do material. Dois métodos de análise são abordados, o de Wöhler e o da energia dissipada acumulada. Na abordagem de Wöhler foram construídas três equações de fadiga, uma para cada critério de ruptura analisado (convencional; Pronk & Hopman; e, ASU). Para a abordagem da energia dissipada acumulada foram obtidas duas equações de fadiga, uma para o critério convencional e outra para o critério de Pronk & Hopman.

Na abordagem de Wöhler, correlacionou-se diretamente as deformações versus o número de ciclos na ruptura. O gráfico final elaborado é plotado em escalas log-log. Na abordagem da energia dissipada, correlacionou-se a energia dissipada acumulada na ruptura versus o número de ciclos. As Figuras 6 (a) e 6 (b) apresentam as equações de fadiga obtidas pela abordagem de Wöhler e pela abordagem da energia dissipada acumulada, respectivamente.

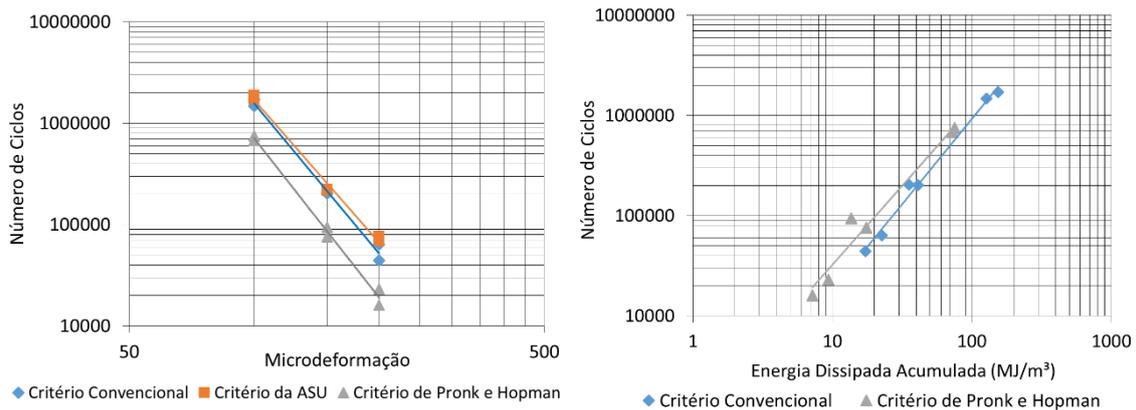


Figura 6: Equações de fadiga: (a) abordagem de Wöhler e (b) abordagem da energia dissipada acumulada.

A Tabela 2 apresenta as equações de fadiga obtidas para cada um dos critérios de ruptura e métodos de análise.

Tabela 2: Equações de fadiga obtidas.

Critério	Abordagem de Wöhler	Abordagem da Energia Dissipada Acumulada
	Equação de Fadiga	Equação de Fadiga
Convencional	$N_f = 1,094 \times 10^{16} \varepsilon_t^{-4,922}$	$N_f = 3,627 \times 10^2 W_{ac}^{1,703}$
Pronk & Hopman	$N_f = 1,963 \times 10^{16} \varepsilon_t^{-5,221}$	$N_f = 8,637 \times 10^2 W_{ac}^{1,574}$
ASU	$N_f = 3,742 \times 10^{15} \varepsilon_t^{-4,672}$	-

Segundo a Tabela 2, quanto à abordagem de Wöhler, pode-se constatar que as equações de fadiga adquiridas por meio dos critérios baseados na degradação da rigidez (convencional e ASU) são bastante semelhantes. Contudo, devido à diferença da inclinação entre as duas equações, para deformações elevadas (maiores que 200 $\mu\text{m/m}$), ou seja, revestimentos asfálticos com pouca espessura, o critério da ASU apresenta maior resistência à fadiga. Entretanto, para revestimentos de maiores espessuras que apresentem pequenas deformações de tração na fibra inferior da camada asfáltica (menores que 100 $\mu\text{m/m}$), o critério convencional de ruptura apresenta melhores desempenhos à fadiga.

Para o critério de Pronk & Hopman, na abordagem de Wöhler, verifica-se em todos os casos, menor resistência à fadiga. Isto evidencia que é muito mais conservador utilizar este critério na abordagem de Wöhler.

No caso da abordagem da energia dissipada acumulada, as equações geradas pelo critério de Pronk & Hopman apresentam um maior desempenho à fadiga para um mesmo valor de energia dissipada acumulada. Entretanto, devido à inclinação das curvas obtidas, para valores energéticos acumulados maiores que 840 MJ/m^3 , o critério convencional de ruptura tende a apresentar uma resistência à fadiga maior que o critério de Pronk & Hopman.

Cabe salientar, que é necessário realizar a simulação numérica da estrutura do pavimento para avaliar de forma concreta a influência dos critérios de ruptura e dos métodos de análise no dimensionamento do revestimento asfáltico.

3.4. Modelização da estrutura do pavimento

Esta última fase do trabalho, teve como objetivo a modelização da estrutura de um pavimento flexível, utilizando os diferentes modelos de fadiga obtidos por diferentes critérios de ruptura e métodos/abordagens de análise. A constituição da estrutura do pavimento foi definida com as seguintes características: camada do revestimento asfáltico de 18 cm; camada de base com 18 cm; camada da sub-base com 20 cm; e, camada de fundação infinita. A estrutura do pavimento definida para a simulação numérica é de um dos segmentos que estão sendo monitorados na BR-101/SC. O segmento localiza-se no contorno de Araranguá-SC, entre os km 411,5 e 412,5, sendo coordenado pela Rede Temática de Tecnologia do Asfalto/Petrobras. A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados na simulação numérica.

Tabela 3: Parâmetros das camadas.

Camadas	Parâmetros Elásticos e/ou Viscoelásticos			
	Módulo de Elasticidade (MPa)	Módulo Dinâmico (MPa)	Coefficiente de Poisson (ν)	Ângulo de Fase ($^{\circ}$)
Mistura Asfáltica (20 °C e 10 Hz)	-	7895	0,30	24,4
Camada da Base (Brita Graduada)	260	-	0,35	-
Camada da Sub-Base (Macadame Seco)	210	-	0,35	-
Camada da Fundação (Páleo Duna)	180	-	0,35	-

A partir dos parâmetros elásticos e/ou viscoelásticos das camadas do pavimento, e com as espessuras iniciais adotadas, conseguiu-se preencher todas as informações necessárias no que diz respeito à estrutura a ser simulada. Contudo, ainda foi necessário definir o carregamento sobre a estrutura. Quanto ao carregamento, foi considerado um eixo simples de roda dupla de 8,2 toneladas, com as seguintes características: distância entre rodas de 32 cm, carga por roda de 2050 kgf, área de contato circular com raio de 10,8 cm (366 cm²) e pressão de contato pneu/pavimento de 5,6 kgf/cm². A velocidade do veículo foi definida em 20 m/s (72 km/h), ou seja, a uma frequência aproximada de 10 Hz. A temperatura do revestimento asfáltico na simulação foi definida em 20 °C. Na simulação numérica, determinou-se a maior deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico, que foi de 70,7 $\mu\text{m/m}$.

A vida útil à fadiga do revestimento asfáltico depende de quantos ciclos de carregamento este revestimento consegue resistir até que se alcance a ruptura. Como já mencionado anteriormente, este valor necessário para levar o pavimento à ruptura varia de acordo com diferentes critérios e abordagens de análise. Na abordagem de Wöhler, para calcular o número de aplicação do eixo padrão de 8,2 toneladas (N_f) para levar o revestimento de 18 cm à ruptura por fadiga, basta entrar na equação de fadiga com a deformação específica de tração de 70,7 $\mu\text{m/m}$. Na abordagem de energia dissipada acumulada, deve-se primeiro calcular a energia dissipada inicial a partir da deformação de tração (70,7 $\mu\text{m/m}$), conforme a Equação 5, entrando com os valores do módulo dinâmico (7895 MPa) e do ângulo de fase (24,4°) da mistura asfáltica na temperatura de 20 °C e frequência de carregamento de 10 Hz (72 km/h do eixo padrão de roda dupla). Com o valor de energia dissipada inicial, obtém-se a energia dissipada acumulada pelas equações apresentadas na Figura 7, que correlacionam para os diferentes critérios de ruptura, a energia dissipada inicial (W_i) (no 50º ciclo de carregamento) e a energia dissipada acumulada (W_{ac}) (na ruptura - segundo o critério adotado). Os modelos apresentados na Figura 7, foram obtidos a partir dos ensaios de fadiga realizados para a mistura asfáltica estudada. Com a energia dissipada acumulada, faz-se então, uso da equação da fadiga da abordagem da energia para avaliar a vida útil do revestimento asfáltico considerando os diferentes critérios de ruptura.

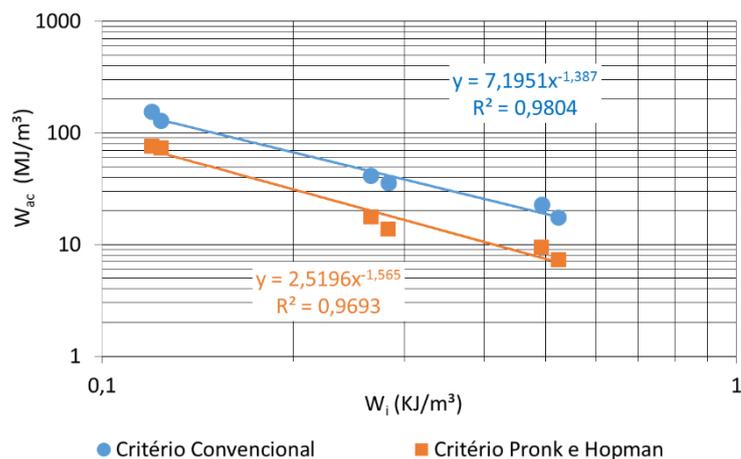


Figura 7: Relação gráfica entre a energia dissipada inicial e a energia dissipada acumulada para os diferentes critérios de ruptura abordados.

A partir da energia dissipada inicial (W_i) calculada através da Equação 5 e utilizando os modelos da Figura 7, obteve-se um valor de 443,7 MJ/m³ de energia dissipada acumulada para o critério convencional e 263,7 MJ/m³ para o critério de Pronk & Hopman.

A Tabela 4 apresenta a vida à fadiga do revestimento asfáltico com 18 cm de espessura e 70,7 µm/m de deformação na fibra inferior da camada asfáltica, considerando os diferentes métodos de análise e critérios de ruptura. O $N_{8,2t}$ representa o número de aplicação do eixo padrão de 8,2 toneladas para levar o revestimento de 18 cm à ruptura por fadiga.

Tabela 4: Desempenho do revestimento asfáltico à fadiga.

Critério	Abordagem de Wöhler	Abordagem da Energia Dissipada Acumulada
	$\epsilon_t = 70,7 \mu\text{m/m}$	$W_{ac} = 443,7 \text{ MJ/m}^3$ (Critério Convencional) $W_{ac} = 263,7 \text{ MJ/m}^3$ (Pronk & Hopman)
Convencional	$N_{8,2t} = 8,633 \times 10^6$	$N_{8,2t} = 1,168 \times 10^7$
Pronk & Hopman	$N_{8,2t} = 4,336 \times 10^6$	$N_{8,2t} = 5,587 \times 10^6$
ASU	$N_{8,2t} = 8,563 \times 10^6$	-

Pode-se constatar, para a abordagem de Wöhler, que o critério convencional de ruptura apresenta maior vida útil à fadiga para uma deformação de 70,70 µm/m, seguido do critério da ASU e de Pronk & Hopman. Neste caso, verifica-se que é mais conservador considerar a falha por fadiga segundo critérios baseados na energia dissipada. Em termos de espessura da camada de revestimento asfáltico, para os critérios se equipararem, precisaria de uma espessura de revestimento de 18,02 cm e 20,29 cm, quando utilizados os critérios de Pronk & Hopman e da ASU, respectivamente.

Quanto à abordagem da energia dissipada acumulada, pode-se concluir, que o critério de Pronk & Hopman é mais conservador que o critério convencional. Em termos de espessura da camada de revestimento asfáltico, para os critérios se equipararem, precisaria de uma espessura de revestimento de 20,62 cm, quando utilizado o critério de Pronk & Hopman.

Comparando as abordagens da energia dissipada acumulada e de Wöhler, existe uma diferença de 26,10% na vida útil à fadiga para os critérios convencionais de ruptura e de 22,39% na vida útil para os critérios de Pronk & Hopman. Isto evidencia que a abordagem da energia dissipada

acumulada tende a apresentar valores de resistência à fadiga maiores do que a abordagem de Wöhler, que considera diretamente as deformações de tração máximas atuantes na fibra inferior da camada asfáltica.

4. CONCLUSÕES

Os estudos conduzidos neste trabalho constataram que os métodos de análise e os critérios de ruptura por fadiga apresentam influências no dimensionamento do pavimento. Nesta pesquisa, as análises foram conduzidas através das abordagens de Wöhler e da energia dissipada acumulada, e também, aplicados três critérios de ruptura, o critério de Pronk & Hopman, o critério da Arizona State University (ASU) e o critério convencional.

Comparando-se o comportamento mecânico de um pavimento flexível perante estes dois métodos de análise considerados, a abordagem de energia dissipada acumulada apresentou revestimentos asfálticos mais resistentes com relação à fadiga, ou seja, com um número de ciclos mais elevado para alcançar a ruptura. Os procedimentos necessários para concepção das curvas de fadiga pela abordagem da energia dissipada acumulada foram muito mais complexos, estando sujeitos a uma gama maior de variáveis.

O critério de ruptura de Pronk & Hopman foi sem dúvida o que produziu menores valores de pontos de ruptura se comparados aos outros critérios, em ambas abordagens. Neste sentido, conclui-se que a aplicação deste critério de ruptura por fadiga é muito mais conservadora, resultando em maior espessura do revestimento asfáltico no dimensionamento.

Os critérios baseados na degradação da rigidez, tais como o critério convencional de redução em 50% da rigidez inicial e o critério da ASU, apresentaram curvas de fadiga bastante semelhantes na abordagem de Wöhler. Ambos se diferenciaram muito pouco no que diz respeito à resistência à fadiga e espessura do revestimento asfáltico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Rede Temática do Asfalto/Petrobras pelos investimentos realizados no Laboratório de Pavimentação da UFSC e ao Laboratório de Pavimentação da UFSC pelo suporte na realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- BERNUCCI, Liedi Bariani et al. "Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros". Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro. 504 f. 2008.
- KHALID, H. A. "Comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous materials". *Materials & Structures*, v.33, n 231, p. 457. 2000.
- MELO, João Victor Staub de. "Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos". Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2014.
- ZEIADA, Waleed. "Endurance limit for HMA based on healing phenomenon using viscoelastic continuum damage analysis". Tese (Doutorado). Arizona State University. 439 f. 2012.
- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation. "AASHTO T321: Standard method of test for determining the fatigue life of compacted asphalt mixtures subjected to repeated flexural bending". *Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*. Washington, DC. 2014.
- EN - European Standard. "EN 12697-24: Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt, part 24: Resistance to fatigue". CEN, Brussels. 2018.
- SYBILSKI, Dariusz; BANKOWSKI, Wojciech. "Energetic method as an alternative for conventional method in fatigue life analysis of bituminous mixtures". *Pavement Technology Division, Road and Bridge Research Institute, Poland*. 2007.

- SOULIMAN, M. I.; ZEIADA, W. A.; KALOUSH, K. E.; MAMLOUK, M. S. “Assessment of different flexure fatigue failure analysis methods to estimate the number of cycles to failure of asphalt mixtures”. Four Point Bending, Chapter 3. 2012.
- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation. “AASHTO M323: Standard specification for Superpave volumetric mix design”. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2013.
- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation. “AASHTO R35: Standard practice for Superpave volumetric design for hot-mix asphalt (HMA)”. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2012.
- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation. “AASHTO T283: Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage”. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2011.
- AFNOR - Association Française de Normalisation. “AFNOR NF P 98-250-2: Essais relatifs aux chaussées - préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 2: compactage des plaques”. Association Française de Normalisation, AFNOR. 1991.