

Desenvolvimentos recentes em ensaios de fadiga em ligantes asfálticos

Thaís Ferreira Pamplona¹, Javier Yesid Mahecha Nuñez², Adalberto Leandro Faxina³

Resumo: A resistência ao trincamento por fadiga afeta diretamente a vida útil dos pavimentos asfálticos e, no intuito de melhorar o desempenho das misturas asfálticas à fadiga, aditivos têm sido incorporados ao ligante asfáltico. O enrijecimento do ligante asfáltico provocado pelos aditivos, via de regra, aumenta a resistência à deformação permanente, mas, por outro lado, ainda não se sabe precisamente qual o efeito deles sobre a resistência à fadiga e ao trincamento térmico dos ligantes asfálticos. Um dos principais desafios atuais para os pesquisadores é o desenvolvimento de um procedimento rápido para a determinação da resistência à fadiga dos ligantes asfálticos em laboratório. Na linha do tempo do desenvolvimento de ensaios de fadiga, Bahia et al. (2001) propuseram o ensaio de varredura de tempo (*time sweep*). Em seguida, Johnson (2010) desenvolveu o ensaio LAS (*Linear Amplitude Sweep*), no qual é ajustado um modelo que correlaciona a vida de fadiga do ligante asfáltico com a carga aplicada. Mais recentemente, Hintz (2012) propôs algumas mudanças no procedimento do ensaio LAS, estabelecendo o LAS modificado e um novo método de análise dos resultados. Tendo em vista tais desenvolvimentos recentes, este trabalho tem como objetivo apresentar os procedimentos de ensaio mais recentes (*time sweep*, LAS original e LAS modificado) para caracterização do comportamento à fadiga dos ligantes asfálticos, ilustrando a sua aplicabilidade na caracterização de ligantes asfálticos modificados.

Palavras-chave: *Linear amplitude sweep* (LAS). *Time sweep*. Fadiga. Ligantes asfálticos modificados. Ácido polifosfórico.

Abstract: The resistance to fatigue cracking affects directly the lifespan of asphaltic pavements. In order to improve the fatigue performance of HMA mixes, additives have been incorporated into the asphalt binder. The hardening of the asphalt binder induced by additives, as a rule, increases the rutting resistance, but, on the other hand, it is not clearly known which are their effects on the resistance of asphalt binders to fatigue and thermal cracking. One of the main actual challenges for researchers is the development of a rapid test procedure to determine the fatigue resistance of asphalt binder in the laboratory. In the time line of the development of fatigue tests, Bahia et al. (2001) proposed the time-sweep test. Afterward, Johnson (2010) developed the LAS test (Linear Amplitude Sweep), in which a model that correlates the fatigue life of asphalt binders to the load applied is adjusted. More recently, Hintz (2012) proposed some changes in the LAS test procedure, establishing the modified LAS and a new method to analyze the results. Based on these recent developments, this work aims to introduce the most recent procedures (time sweep, original LAS and modified LAS) to evaluate the fatigue behavior of asphalt binders, exemplifying its applicability in the characterization of modified asphalt binders.

Keywords: Linear amplitude sweep (LAS). Time sweep. Fatigue. Modified asphalt binders. Polyphosphoric acid.

1 INTRODUÇÃO

A resistência ao dano provocado por fadiga tem um efeito significativo no tempo de serviço dos pavimentos asfálticos. Existe um consenso de que o ligante asfáltico exerce um papel crítico quanto à resistência ao dano por fadiga e, por esta razão, pesquisadores têm se dedicado ao desenvolvimento de um procedimento de ensaio efetivo para a determinação da tolerância à fadiga dos ligantes asfálticos.

Em meados da década de 1980, o programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) foi iniciado, com o objetivo de inves-

tigar novas propriedades reológicas a serem aplicadas na caracterização dos ligantes asfálticos.

Este esforço de pesquisa culminou no lançamento da especificação Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*), na qual o parâmetro $G^*\text{sen}\delta$ (módulo complexo vezes seno do ângulo de fase) foi adotado como critério de fadiga da especificação. O que se pretendia, à época, era expressar a resistência dos ligantes asfálticos ao trincamento por fadiga, em resposta à necessidade de adotar um parâmetro simples e de fácil obtenção.

Posteriormente à implementação da especificação Superpave, constatou-se que o parâmetro $G^*\text{sen}\delta$ seria inadequado para avaliar os ligantes asfálticos, pois não se relacionava bem com o acúmulo de dano por fadiga de misturas asfálticas, quando avaliadas por ensaio de fadiga em viga sob deformação controlada (Shenoy, 2002). Bahia et al. (1999) também constataram que o parâmetro $G^*\text{sen}\delta$

¹ Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (thaispamplona@hotmail.com).

² Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (jymahechan@gmail.com).

³ Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (alfaxina@sc.usp.br).

Manuscrito recebido em 04/05/2013 e aprovado para publicação em 07/09/2014. Este artigo é parte de TRANSPORTES v. 22, n. 3, 2014. ISSN: 2237-1346 (online).

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v22i3.682>.

seria ineficiente em detectar a resistência à fadiga, especialmente para ligantes asfálticos modificados, empregando o ensaio de fadiga em viga. A ineficácia do parâmetro G^* sendo seria devida ao fato de ser determinado por meio de ensaios realizados na região de viscoelasticidade linear, para níveis baixos de deformação, enquanto o fenômeno real se daria na região de viscoelasticidade não-linear, sob grandes deformações.

Durante o projeto NCHRP 9-10 (*National Cooperative Highway Research Program*), uma varredura de tempo (*time sweep*) foi proposta (Bahia et al., 2001) para avaliar a resistência à fadiga dos ligantes asfálticos. Seria uma alternativa para tentar contornar as deficiências da especificação vigente, relativas ao controle do trincamento por fadiga do ligante asfáltico. Este ensaio se baseia na definição de dano por fadiga como a degradação da integridade do material pela ação de cargas repetidas. O procedimento de ensaio possibilita a escolha da amplitude da carga, o que permite considerar a estrutura do pavimento e as cargas devidas ao tráfego. Se o ensaio for realizado em níveis de tensão suficientes, o ensaio pode medir indicadores relevantes do desempenho à fadiga (Anderson et al., 2001; Martono et al., 2007). O *time sweep* tem mostrado uma boa correlação com os resultados de vida de fadiga de misturas asfálticas, indicando que é capaz de capturar a contribuição do ligante asfáltico sobre a resistência à fadiga das misturas asfálticas (Bahia et al., 2001). No entanto, é um ensaio que pode ser excessivamente demorado, em virtude do tempo necessário para levar o material à falha, tornando inviável sua inclusão em especificações.

O desenvolvimento de um procedimento rápido para determinar a resistência à fadiga de ligantes asfálticos tem sido um desafio para a comunidade científica (Johnson, 2010; Hintz, 2012). Johnson (2010) desenvolveu o ensaio LAS (*Linear Amplitude Sweep*) para determinar características dos ligantes asfálticos relacionadas à fadiga. Este ensaio acelerado de fadiga é dividido em duas etapas: (i) uma varredura de frequência e (ii) uma varredura de amplitude de deformação. Na primeira etapa (varredura de frequência), as propriedades viscoelásticas na região linear são determinadas com o intuito de estabelecer um quadro de referência apropriado para avaliar o acúmulo do

dano na amostra. Na segunda etapa (varredura de amplitude de deformação), é realizado um ensaio em que o material é levado à fratura, por meio do qual os parâmetros do modelo de fadiga são determinados. A teoria do dano contínuo viscoelástico (VECD - *Viscoelastic Continuum Damage*) é utilizada na análise dos dados e na determinação do modelo de fadiga do ligante asfáltico. Esta teoria utiliza o desvio do comportamento viscoelástico linear e a redução na rigidez da amostra para caracterizar o acúmulo do dano. O ensaio proposto por Johnson (2010) é especificado em termos de amplitude de deformação, considerando que o raio da amostra permanece constante durante todo o tempo de ensaio. No entanto, análises realizadas por meio de imagens mostraram que isto não acontece (Hintz, 2012), indicando que o dano por fadiga não se dá pela redução de G^* .

Hintz (2012) propôs algumas modificações no ensaio LAS e na análise dos resultados. Na sua pesquisa de doutorado, a autora utilizou dois ligantes asfálticos para verificar a hipótese de que a fratura é a responsável pela aparente redução no módulo durante o ensaio de varredura de tempo (*time sweep*). A autora sugere que os resultados sejam analisados utilizando o modelo baseado na fratura ao invés da análise pela teoria do dano contínuo viscoelástico, visto que foi visualizado que ocorrem macrofraturas durante o ensaio e que o raio da amostra não permanece constante ao longo do processo de fadiga do material. Hintz (2012) concluiu que o ensaio LAS desenvolvido por Johnson (2010) não é um ensaio de fadiga verdadeiro e é problemático devido às mudanças relativamente grandes e bruscas na amplitude de deformação. A autora recomenda que o carregamento de amplitude deva ser aumentado de maneira linear em cada ciclo de carregamento, ao invés de degraus de amplitude de deformação, com o intuito de eliminar as trincas na periferia da amostra ainda na fase de condicionamento da amostra. Hintz (2012) chama a atenção para o fato que os reômetros não são projetados para mudanças de carregamento bruscas e que as modificações propostas no ensaio LAS serão mais compatíveis com as capacidades dos equipamentos em uso. Hintz (2012) também recomenda que o ensaio LAS seja considerado um ensaio de “tolerância à fadiga” em vez de um ensaio de “resistência à fadiga”, uma vez que a tendência da propaga-

ção da trinca no ligante asfáltico no ensaio verdadeiro de fadiga (ensaio de varredura de tempo) é diferente da tendência observada no ensaio LAS modificado.

No estudo da fadiga de materiais asfálticos, considera-se comumente que o fenômeno se dê sob deformação constante, quando se parte do pressuposto de que a maioria dos pavimentos é esbelta e, nestas condições, a camada asfáltica deforma acompanhando a deformação das camadas subjacentes (Bahia e Anderson, 1995). Existe uma forte tendência a se pensar que há um aumento da resistência à fadiga com a redução da rigidez dos ligantes asfálticos, mas vários estudos mostraram que a mistura asfáltica pode, mas não sempre, exibir um aumento na resistência à fadiga com o aumento da rigidez (Vallerga et al., 1972; Harvey e Tsai, 1997; Hintz et al., 2011). Hintz et al. (2011) avaliou o efeito do enrijecimento provocado pelo envelhecimento na resistência à fadiga por meio do ensaio LAS proposto por Johnson (2010) e observou que a resistência à fadiga dos ligantes asfálticos é dependente do nível de tensão aplicado. Hintz et al. (2011) também concluíram que o enrijecimento provocado pelo envelhecimento tem um efeito positivo na resistência à fadiga para níveis de tensão mais baixos, mas tem um efeito negativo para níveis de tensão mais elevados.

Pamplona (2013), utilizando o LAS modificado, também verificou que o envelhecimento a longo prazo contribui para o aumento da tolerância à fadiga de ligantes asfálticos modificados com PPA, na extensão em que o envelhecimento oxidativo atua no sentido de aumentar o comprimento da trinca na ruptura. Em relação à adição de PPA, Pamplona (2013) observou que a tolerância à fadiga dos ligantes asfálticos aumenta com a adição de PPA, embora o efeito do PPA tenha intensidades diferentes para diferentes tipos de ligante asfáltico.

Nuñez (2013) estudou o comportamento à fadiga de 12 ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho (PG 76-xx) nos ensaios de varredura de tempo e LAS obtendo ordenamentos dos materiais em relação aos diversos parâmetros de fadiga. Foram estudados também os efeitos do nível de deformação (baixo e alto, representativos de pavimentos espessos e esbeltos, respectivamente), da temperatura (25 e 35°C) e envelhecimento. Os resultados das análises do dano contínuo viscoe-

lástico mostraram que o aumento da temperatura produz incremento na vida de fadiga e o envelhecimento provoca aumento da vida de fadiga para baixos níveis de deformação e diminuição da vida de fadiga quando são considerados altos níveis de deformação.

Martins (2014) realizou a validação do ensaio LAS com ensaios de fadiga em misturas asfálticas, utilizando seis ligantes convencionais e um modificado por PPA. Os resultados mostraram boas correlações (em torno de 85%) entre os resultados de tolerância ao dano por fadiga de ligantes asfálticos e os resultados de vida de fadiga de misturas asfálticas (ensaio de fadiga por carregamento cíclico uniaxial). Estes resultados também confirmaram que o modelo VECD e S-VECD (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*) é adequado para prever o comportamento com relação à tolerância ao dano do ligante asfáltico e a estimativa da vida de fadiga da mistura asfáltica.

Observa-se, à luz do histórico apontado, que grandes esforços têm sido dedicados à concepção de um método de ensaio acelerado para determinação seja da vida de fadiga ou de características do ligante asfáltico associadas à fadiga, para fins de especificação. Tendo em vista a importância do assunto e os recentes desenvolvimentos alcançados nesta área, este trabalho tem como objetivo detalhar os dois procedimentos de ensaio citados anteriormente para caracterização do comportamento à fadiga de ligantes asfálticos (*time sweep* e LAS). A título de ilustração destes procedimentos, serão apresentados resultados de caracterização de ligantes asfálticos puros e modificados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para preparar os ligantes asfálticos modificados, foram utilizados dois ligantes asfálticos de base: o CAP 50/70 fornecido pela REPLAN-PETROBRAS e o CAP 50/70 fornecido pela LUBNOR-PETROBRAS. O CAP REPLAN foi modificado com os seguintes aditivos: o ácido polifosfórico (PPA), o copolímero de etileno acetato de vinila (EVA) e a borracha de estireno-butadieno (SBR). O CAP LUBNOR foi aditivado apenas com PPA, em proporções distintas. O ácido polifosfórico, com designação comercial de Innovalt E200, foi fornecido pela Innophos Inc., USA. O EVA tipo

HM 728, adquirido da Politeo, foi fornecido pelo Cenpes-Petrobras. O SBR tipo Solprene 1205, adquirida da Dynasol, foi e fornecido pela Betunel. Os ligantes asfálticos preparados com CAP REPLAN foram aditivados de maneira a aumentar o PG de 64 (PG do CAP puro) para 76, sendo utilizadas, para tal, proporções específicas dos modificadores para cada formulação: o CAP+PPA foi modificado com 1,2%, o CAP+EVA foi modificado com 8% e o CAP+SBR com 5,5%. O CAP LUBNOR foi modificado com as seguintes proporções de PPA: 0,0, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0%. A Tabela 1 apresenta a formulação dos ligantes asfálticos e seus respectivos graus de desempenho.

Tabela 1 - Formulações e graus de desempenho PG dos ligantes asfálticos

formulação	origem do CAP	grau de desempenho (PG)
CAP + 1,2% PPA	Replan	76-18
CAP + 8,0% EVA	Replan	82-24
CAP + 5,5% SBR	Replan	76-22
CAP + 0,0% PPA	Lubnor	70-24
CAP + 0,5% PPA	Lubnor	76-24
CAP + 1,0% PPA	Lubnor	76-24
CAP + 1,5% PPA	Lubnor	88-24
CAP + 2,0% PPA	Lubnor	88-24

2.2 Varredura de tempo (*time sweep*)

Este ensaio é realizado no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) utilizando amostras envelhecidas tanto a curto quanto a longo prazo (RTFOT e/ou PAV). A amostra é testada utilizando a geometria de placas paralelas de 8 mm de diâmetro com distância de 2 mm entre placas. É comumente recomendado como o procedimento mais adequado para aplicação de cargas repetidas (a tensão ou deformação controlada) a uma temperatura e uma frequência selecionadas, de modo a induzir o dano no ligante asfáltico (Bahia et al., 2001). Inicialmente, o critério de falha foi arbitrado como o número de ciclos completados no ponto onde há uma redução de 50% do módulo complexo inicial G^*_i (Shenoy, 2002). Este critério foi comparado com os resultados obtidos em misturas asfálticas, apresentando correlações com $R^2=0,84$ quando comparados com o

número de ciclos associados a uma redução de 50% do módulo da mistura, em ensaios de viga (Bahia et al., 2001).

Pesquisas posteriores apontaram que esse critério é arbitrário e não tem relação com o acúmulo de dano na amostra (Anderson et al., 2001), o que motivou a proposição de outras definições de falha, como a baseada no conceito de energia dissipada. Tal critério inclui a taxa de energia dissipada (DER – *Dissipated Energy Ratio*) e a taxa de acúmulo de dano (Anderson et al., 2001). A energia dissipada por ciclo (W_i) para um material viscoelástico é calculada de acordo com a equação 1.

$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \text{sen} \delta_i \quad (1)$$

onde W_i é a energia dissipada no ciclo i , σ_i é a tensão no ciclo i , ε_i é a deformação no ciclo i e δ_i é o ângulo de fase no ciclo i .

A energia dissipada acumulada até o ciclo n (W_{Tn}) é definida de acordo com a equação 2:

$$W_{Tn} = \sum_{i=1}^n W_i \quad (2)$$

A taxa de energia dissipada (DER) definida por Pronk e Hopman (1990), usada como critério de fadiga, é definida pela equação 3, onde W_n é a energia dissipada no ciclo n :

$$DER = \frac{W_{Tn}}{W_n} \quad (3)$$

No processo de desenvolvimento dos ensaios para avaliar a fadiga de ligantes asfálticos, procurou-se avaliar a resistência à fadiga independente do modo de carregamento ou tipo de pavimento. A solução baseada na taxa de energia dissipada foi adotada por se acreditar que este método é independente do modo de carregamento (Pronk, 1995). Na revisão de critérios de fadiga para misturas asfálticas, Ghuzlan e Carpenter (2000) também concluíram que o critério de energia dissipada é mais preciso para indicar o acúmulo de dano na amostra. O critério de falha empregado é o N_p , que representa o número de ciclos até o qual a amostra não apresenta dano, isto é, até o ciclo em que o coeficiente angular do DER versus o

número de ciclos é constante.

Bonnetti et al. (2002) avaliaram os critérios de falha N_{p10} e N_{p20} (número de ciclos associados a um desvio de 10 e 20%, respectivamente, em relação à linha de igualdade $DER=N$) e concluíram que o N_{p20} representa melhor o comportamento à fadiga dos ligantes asfálticos, uma vez que este parâmetro se mostrou mais claramente definido, menos afetado pelo erro experimental e menos sensível ao tipo de carregamento. O critério N_p também foi interpretado como o número de ciclos onde tem início a propagação de trincas. Esta medida pode ser determinada usando a equação 4 (Bonnetti et al., 2002).

$$20\% = \frac{DER_{N_{p20}} - N_{p20}}{N_{p20}} * 100 \quad (4)$$

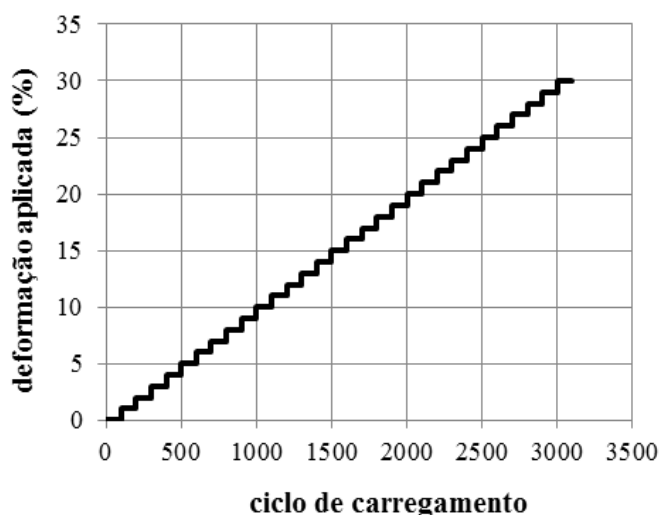
onde N_{p20} é o número de ciclos associados a um desvio de 20%, em relação à linha de igualdade $DER=N$ e DER é a taxa de energia dissipada.

As amostras CAP 50/70 REPLAN puro, CAP+PPA, CAP+EVA e CAP+SBR foram utilizadas para ilustrar a aplicação do ensaio de varredura de tempo. São apresentados os resultados dos ensaios realizados em condições fixas: temperatura de 25°C, frequência de 10 rad/s, percentual de deformação de 10% e amostras envelhecidas a curto prazo. A temperatura de 25°C foi adotada, tendo em vista que diversos pesquisadores têm adotado esta tem-

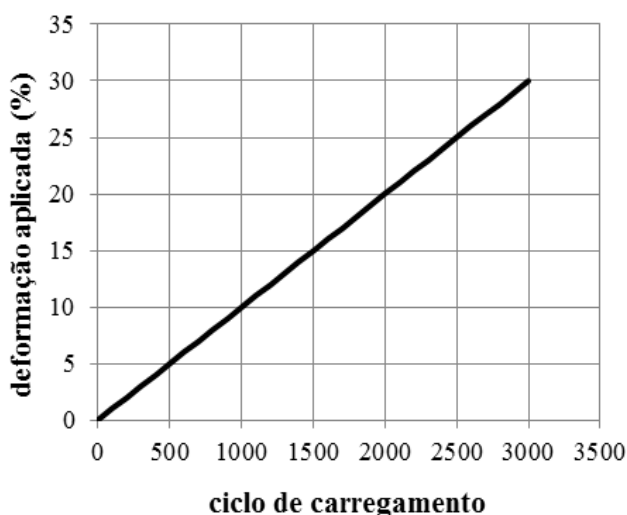
peratura para ensaios de fadiga (Bahia e Anderson, 1995; Bonetti et al., 2002; Anderson et al., 2001). Outras condições de ensaio foram aplicadas e os resultados obtidos serão objeto de outras publicações.

2.3 Varredura de amplitude linear (LAS)

O ensaio de varredura de amplitude linear foi proposto por Johnson (2010) como um ensaio acelerado de fadiga para ligantes asfálticos. O LAS é conduzido no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) e pode ser realizado nas amostras envelhecidas a curto e/ou a longo prazo. A amostra é testada utilizando a geometria de placas paralelas de 8 mm de diâmetro com distância de 2 mm entre placas. O ensaio é dividido em duas etapas: (1) uma varredura de frequência entre 0,1 e 30 Hz é realizada para determinar as propriedades reológicas na região de viscoelasticidade linear, utilizando a amplitude de deformação de 0,1% e (2) uma varredura de amplitude de deformação entre 0,1 e 30% é realizada a uma frequência fixa de 10 Hz. A sequência de carregamento consiste em intervalos de 10 segundos a uma amplitude de deformação constante, sendo cada intervalo seguido por outro intervalo com uma amplitude de deformação maior, conforme apresentado na Figura 1 (a). Mais tarde, Hintz (2012) propôs algumas modificações no procedimento de ensaio, tornando o incremento de deformação linear, conforme indicado na Figura 1 (b).



(a)



(b)

Figura 1 - (a) Incremento da deformação (em degraus) no ensaio LAS (Johnson, 2010) e (b) incremento linear de deformação no ensaio LAS modificado (Hintz, 2012)

Os resultados obtidos da caracterização reológica na região de viscoelasticidade linear e da varredura de amplitude de deformação são utilizados para ajustar um modelo de fadiga do ligante asfáltico, utilizando o princípio de dano

contínuo viscoelástico. Para a caracterização da fadiga em ligantes asfálticos, o modelo é derivado da relação entre a carga aplicada e a vida de fadiga do material (Figura 2).

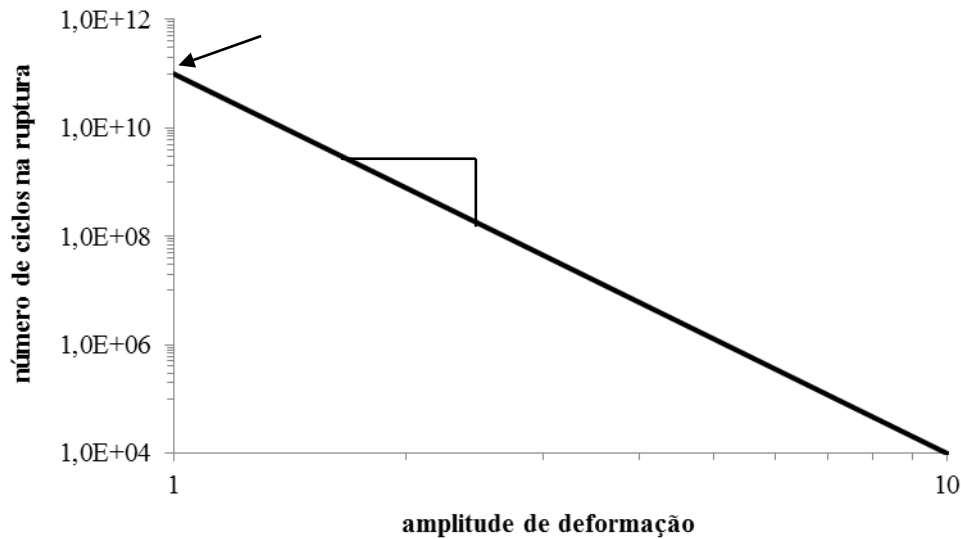


Figura 2 - Modelo de fadiga (Johnson, 2010)

Misturas asfálticas e ligantes asfálticos demonstram apresentar uma boa relação entre a carga aplicada e a vida de fadiga (N_f) de acordo com a equação 5:

$$N_f = A(\gamma_{MÁX})^B \quad (5)$$

onde os parâmetros A e B são característicos do material e $\gamma_{máx}$ é a deformação máxima esperada para uma dada estrutura do pavimento.

O parâmetro B é calculado de acordo com a equação 6:

$$B = 2\alpha \quad (6)$$

sendo α é dado por:

$$\alpha = \frac{1}{m} \quad (7)$$

onde m a inclinação da reta do gráfico log-log do módulo de armazenamento ($G^* \cdot \cos\delta$) versus frequência.

O parâmetro A é calculado de acordo com a equação 8:

$$A = \frac{f(D_f)^k}{k(\pi I_D C_1 C_2)^\alpha} \quad (8)$$

onde f é a frequência (10 Hz), D_f é o valor de $D(t)$ na falha, I_D é o valor inicial de $G^* \cdot \text{sen}\delta$, em MPa, do intervalo de amplitude de deformação de 1,0% e k é definido com a equação 9:

$$k = 1 + (1 - C_2)\alpha \quad (9)$$

Os coeficientes C_0 , C_1 e C_2 podem ser determinados linearizando o modelo ajustado para a relação $G^* \cdot \text{sen}\delta$ versus $D(t)$ (equação 10), onde $D(t)$ é o dano acumulado na amostra, calculado de acordo com a equação 11:

$$G^* \cdot \text{sen}\delta = C_0 - C_1(D)^{C_2} \quad (10)$$

$$D(t) = \sum_{i=1}^N \left[\pi I_D \gamma_0^2 (G^* \cdot \text{sen}\delta_{i-1} - G^* \cdot \text{sen}\delta_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (11)$$

A seleção de um bom critério de falha por trincas por fadiga para misturas asfálticas e ligantes asfálticos vêm sendo o assunto de muita discussão. O critério tradicional mais aceito é o de redução de 50% do módulo inicial. No entanto, Johnson (2010) observou que a redução de 35% no valor de $G^* \cdot \sin \delta$ proporciona uma correlação razoável entre os resultados do ensaio de varredura de tempo e do LAS. Por esta razão, o valor de $D(t)$ pode ser calculado utilizando a equação 12:

$$D(t) = 0,35 \left(\frac{C_0}{C_1} \right)^{\frac{1}{C_2}} \quad (12)$$

Com as modificações propostas por Hintz (2012), o ensaio passou a ser denominado por LAS modificado. A diferença entre os dois procedimentos de ensaio é o formato da sequência de amplitudes de deformação conforme indicado anteriormente na Figura 1 (b). A sequência de carregamento proposta do Hintz (2012) consiste no mesmo número de ciclos (tempo de ensaio) e na mesma faixa de amplitudes de deformação propostos por Johnson (2010). As alterações propostas por Hintz (2012) foram incorporadas ao projeto de norma AASHTO (AASHTO TP 101-12-UL), cujo procedimento é o utilizado para a obtenção dos resultados aqui apresentados. Recentemente tem sido publicada a norma AASHTO TP 101-14 a qual mantém as alterações na sequência de carregamento proposta por Hintz (2012).

Para a análise dos resultados do ensaio LAS, Martins (2014) usou um critério de ruptura diferente do proposto por Johnson (2010), que considerava uma redução de 35% no valor de $G^* \cdot \sin \delta$, adotando um parâmetro denominado C_f correspondente ao valor de integridade do material no ponto onde começa a rápida propagação da fissura. O ajuste da curva da equação 10 é realizado com os dados até o valor de C_f , dado que após este ponto o crescimento da fissura é instável.

Hintz (2012) mostrou que os resultados obtidos por meio dos ensaios LAS modificado (a_f) e varredura de tempo (N_f) apresentam uma boa correlação. A autora observou que, de um modo geral, o critério de ruptura adotado no LAS modificado (a_f) apresenta boa correlação com o critério de ruptura adotado no *time*

sweep (N_f), tanto para ligantes asfálticos puros como para ligantes asfálticos modificados com diferentes tipos de polímeros.

As amostras preparadas com base no CAP 50/70 da Lubnor, ou seja, aquelas modificadas com proporções de PPA de 0,0, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0%, foram utilizadas para ilustrar a aplicação do ensaio de varredura de amplitude linear. São apresentados resultados de ensaios realizados em condições fixas: temperatura de 25°C e amostras envelhecidas a longo prazo. Todos os ensaios foram realizados em duplicata a fim de garantir uma variabilidade menor que 15%. É importante relatar aqui a dificuldade de se obter uma variabilidade menor que 15% neste ensaio. O que se pôde constatar durante a realização destes ensaios foi que quanto mais rígida a amostra mais difícil é obter um nível satisfatório de repetibilidade.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Varredura de tempo (*time sweep*)

Para o análise dos resultados deste ensaio, foi adotado o conceito de energia dissipada para a determinação do critério de falha. Para o cálculo do número de ciclos, foi adotado o seguinte modelo de ajuste dos dados sugerido por BAHIA et al. (2001):

$$N = N_C + b_1 (DER - R_C) + T (b_2 - b_1) \ln \left[1 + e^{\frac{DER - R_C}{T}} \right] \quad (13)$$

onde N_C o número constante dos ciclos de carregamento, R_C a constante da taxa de energia dissipada, b_1 o coeficiente angular da assíntota inferior de N versus DER , b_2 o coeficiente angular da assíntota superior de N versus DER e T o parâmetro de forma da curva (altera a suavidade da curva).

Utilizando um pacote computacional, foi desenvolvida uma planilha para fazer o ajuste dos dados dos ensaios. Os parâmetros da equação foram obtidos por meio da ferramenta Solver, utilizando o método de ajuste de mínimos quadrados. Na Tabela 1, são apresentados os modelos de fadiga dos ligantes asfálticos, o número de ciclo na falha e o ordenamento em função do número de ciclos na falha.

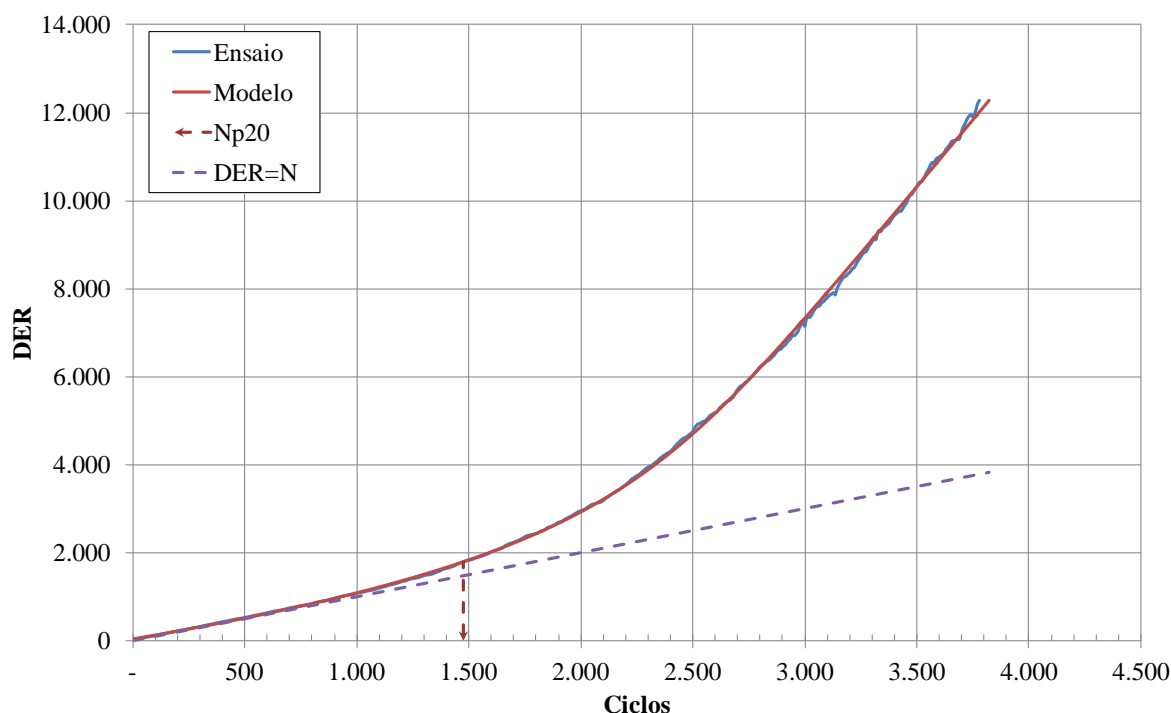
Tabela 1 - Ajuste das curvas de fadiga e ordenamento dos ligantes asfálticos em função do número de ciclos à falha

formulação	coeficientes ajustados						ciclos na falha N	ordenamento
	Nc	T	b ₁	b ₂	Rc	R ²		
CAP+EVA	24.635	7.075	1,0	0,20	23.352	0,99993	22.522	1
CAP+SBR	16.210	17.343	1,6	0,27	0	0,99996	8.937	2
CAP+PPA	5.491	1.312	1,0	0,13	5.273	0,99968	5.071	3
CAP 50/70	1.812	1.351	2,1	0,16	0	0,99985	1.456	4

Na Figura 3, é apresentado um exemplo da determinação da vida de fadiga utilizando o critério de energia dissipada. Como se observa, a equação 13 se ajusta bem aos dados experimentais. Na Figura 4, é apresentado um comparativo da vida de fadiga dos ligantes asfálticos preparados com o CAP 50/70 da Replan. O critério de falha N_{p20} é representado pelas linhas tracejadas verticais. O ordenamento dos materiais no ensaio de varredura de tempo mostra que o CAP+EVA tem o melhor comportamento à fadiga, seguido do CAP+SBR e do CAP+PPA. O CAP puro apresentou o pior comportamento à fadiga.

Vale a pena mencionar que os ensaios de

varredura de tempo normalmente são bastante demorados, especialmente aqueles conduzidos com os ligantes asfálticos modificados. A varredura de tempo feita com o CAP+EVA, que apresentou a maior resistência à fadiga, demorou aproximadamente 6 horas. O ensaio de menor duração foi o realizado com o CAP puro, com uma duração total do ensaio de 40 minutos. Embora seja reconhecido como um ensaio verdadeiro de fadiga, os longos tempos de ensaio necessários para alcançar a falha do material representam o principal obstáculo à incorporação do ensaio de varredura de tempo a especificações de ligantes asfálticos.

**Figura 3** - Exemplo de obtenção da vida de fadiga no ensaio de varredura de tempo para o CAP 50/70 da Replan

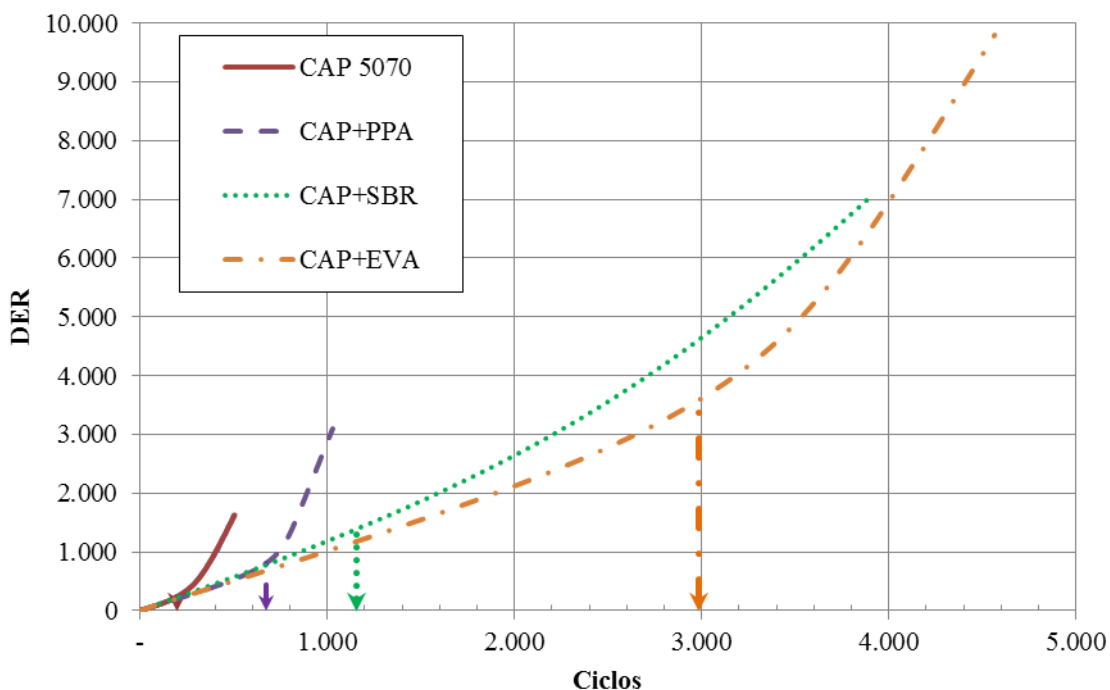


Figura 4 - Variação da taxa de energia dissipada em função do número de ciclos para os ligantes asfálticos envelhecidos a curto prazo, a 25°C, no ensaio de varredura de tempo

3.2 Varredura de amplitude linear (LAS modificado)

Os resultados do ensaio de varredura de amplitude linear foram analisados por meio da teoria do dano viscoelástico contínuo (VECD). A partir desta análise, é possível obter os parâmetros necessários para determinar o modelo de fadiga para o ligante asfáltico, correlacionando a carga aplicada e a vida de fadiga (N_f) por meio da equação 5. Os parâmetros A_{35} e B obtidos para os ligantes asfálticos envelhecidos a longo prazo (PAV) estão apresentados na Tabela 2 e correspondem aos valores médios das réplicas cujos ensaios foram realizados a 25°C. O índice 35 do parâmetro A_{35} corresponde ao critério de ruptura adotado por Johnson (2010), definido pela redução de 35% do valor do módulo inicial das amostras. Os resultados mostram que o parâmetro A_{35} aumenta com a adição de PPA enquanto o parâmetro B diminui.

O parâmetro B depende exclusivamente do valor de α , que é determinado com base na inclinação do gráfico do módulo de armazenamento ($G^* \cdot \cos \delta$) versus a frequência, obtido do ensaio de varredura de frequência. A redução do parâmetro B com o aumento do teor de PPA reflete a diminuição da suscetibilidade ao tempo/temperatura dos ligantes asfálticos por conta da adição de PPA, uma vez que há uma diminuição na inclinação do gráfico de $G^* \cdot \cos \delta$ versus frequência. Tal redução é proporcional

ao teor de PPA adicionado.

Com a diminuição dos valores de B , o ligante asfáltico se torna menos sensível ao aumento da amplitude de deformação. Maiores declividades (maiores valores do parâmetro B) indicam que a vida de fadiga do ligante asfáltico decresce a uma taxa maior quando a amplitude de deformação aumenta. Neste mesmo sentido, menores declividades (menores valores de B) indicam que a vida de fadiga do ligante asfáltico decresce a uma taxa menor quando a amplitude de deformação aumenta.

Tabela 2 - Coeficientes A_{35} e B do modelo de fadiga ajustado aos ligantes asfálticos

% PPA	A_{35}	B
0,0	$5,29 \cdot 10^7$	-5,893
0,5	$1,245 \cdot 10^8$	-6,302
1,0	$1,043 \cdot 10^9$	-7,139
1,5	$1,266 \cdot 10^9$	-7,313
2,0	$3,173 \cdot 10^9$	-7,781

O parâmetro A retrata a variação da integridade do material em função do dano acumulado (variação, por exemplo, de $G^* \cdot \sin \delta$ com o dano acumulado) e do módulo complexo inicial do ligante asfáltico ainda sem dano. É desejável

que o material preserve uma integridade elevada medida por meio do parâmetro $G^*.sen\delta$. Se isto ocorrer, o valor do parâmetro A_{35} será elevado. No entanto, se o ligante asfáltico sofrer uma queda rápida dos valores de $G^*.sen\delta$, o parâmetro A_{35} será baixo. Os resultados indicam que a adição de PPA torna o ligante asfáltico mais resistente ao acúmulo de dano por fadiga, uma vez que ocorre um aumento no parâmetro A_{35} que é proporcional ao teor de PPA.

A Figura 5 apresenta as curvas de vida de fadiga (N_f) dos ligantes asfálticos puro e modificados com PPA em função da amplitude de

deformação. Observa-se que a resistência à fadiga dos ligantes asfálticos é dependente do nível de deformação. Para níveis baixos de deformação, quanto maior a rigidez do ligante asfáltico, maior será a vida de fadiga e, nestas condições, a adição de PPA seria benéfica à resistência à fadiga dos ligantes asfálticos. No entanto, para níveis elevados de deformação, quanto maior a rigidez do ligante asfáltico, menor será a vida de fadiga e, nestas condições, o enrijecimento provocado pela adição de PPA seria prejudicial à resistência à fadiga dos ligantes asfálticos.

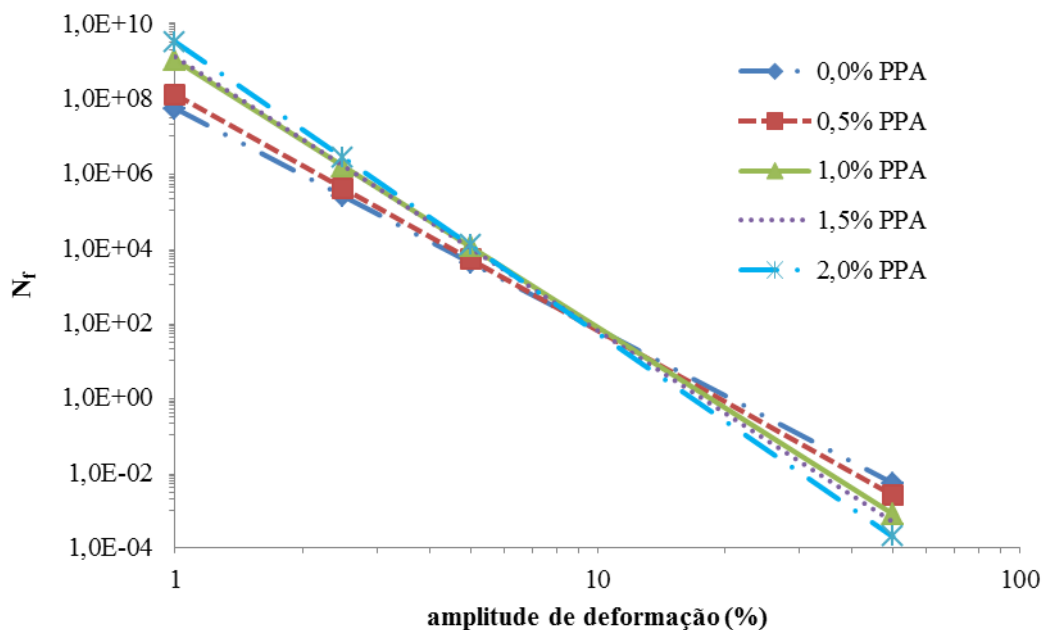


Figura 5 - Variação do número de ciclos na ruptura em função da amplitude de deformação das amostras de CAP LUBNOR modificado com PPA envelhecidas a longo prazo, a 25°C

O mesmo acontece quando se avalia o efeito do envelhecimento termo-oxidativo (longo prazo) sobre a tolerância à fadiga (Figura 6 a e b). Para níveis baixos de deformação, o aumento de rigidez provocado pelo envelhecimento a longo prazo é benéfico à resistência à fadiga, pois proporciona aumento de N_f . Por outro lado, para níveis altos de deformação, o aumento de rigidez provocado pelo envelhecimento a longo prazo torna-se prejudicial, já que o N_f diminui. Tal resultado pôde ser observado para todos os teores de PPA utilizados.

Os resultados do ensaio LAS modificado foram analisados com base no modelo de fratura, uma vez que se adota, na realização deste ensaio, a hipótese de que ocorre propagação de trincas que, por sua vez, levam à redução do

raio efetivo da amostra. Tais variações na geometria da amostra devidas à propagação de trincas são responsáveis pela aparente mudança na capacidade de carregamento das amostras durante o ensaio. O critério de ruptura proposto por Hintz (2012) para analisar os resultados obtidos por meio do ensaio LAS modificado é baseado no ponto de mínimo da taxa de crescimento da trinca em relação ao número de ciclos (da/dN) anterior à fase de rápido aumento na taxa de crescimento da trinca. No ponto de mínimo da curva $da/dN \times a$ é definido o parâmetro (a_f), que representa o comprimento da trinca na falha.

A Figura 7 mostra a variação do comprimento da trinca em relação ao número de ciclos versus o comprimento da trinca das amostras

envelhecidas a longo prazo (PAV), submetidas ao procedimento LAS modificado, na temperatura de 25°C. Este valor mínimo (a_f) é um critério de ruptura lógico, uma vez que indica o começo da ruptura instável e rápida da amostra e coincide aproximadamente com o início da

redução da resistência ao carregamento. De acordo com a Figura 7, pode-se observar que, em geral, os ligantes asfálticos se tornam mais tolerantes ao trincamento por fadiga com a adição de PPA para os níveis de deformação usados no ensaio.

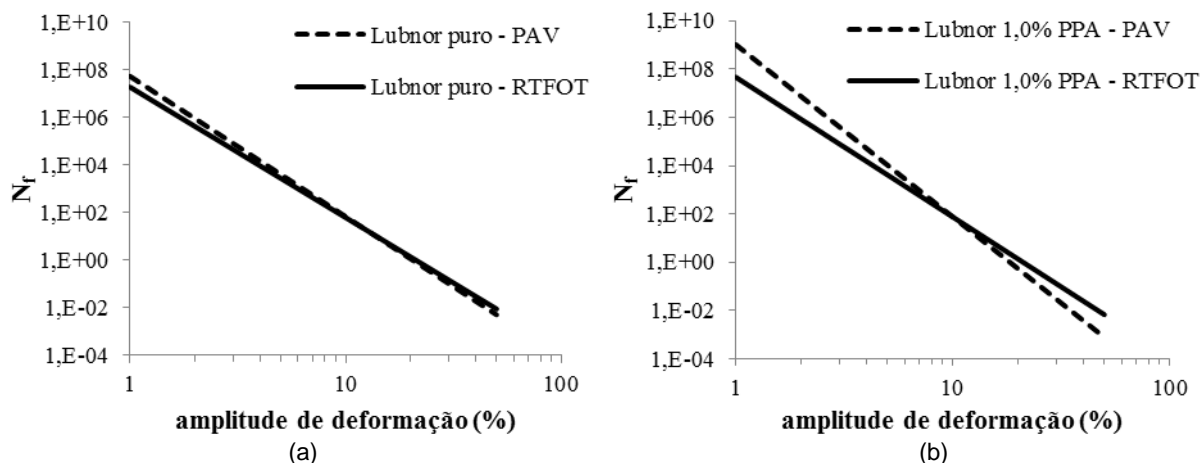


Figura 6 - Variação do número de ciclos na ruptura em função da amplitude de deformação para o CAP Lubnor (a) puro e (b) modificado com 1,0% de PPA, envelhecidos, respectivamente, no PAV e RTFOT, a 25°C

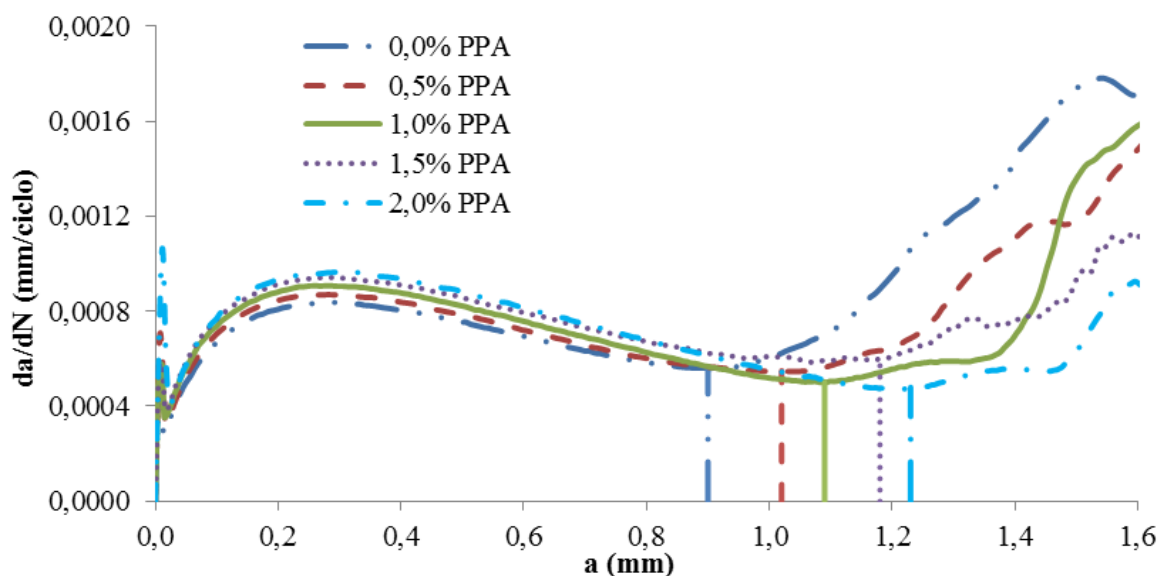


Figura 7 - Variação do comprimento da trinca em relação ao número de ciclos versus o comprimento da trinca - CAP LUBNOR com PPA envelhecidas no PAV, a 25°C

A Figura 8 (a) mostra o efeito do envelhecimento termo-oxidativo na tolerância à fadiga do CAP LUBNOR puro e a Figura 8(b) mostra o efeito do envelhecimento termo-oxidativo na tolerância à fadiga do CAP LUBNOR + 1,0% de PPA. Observa-se que o ligante asfáltico envelhecido a longo prazo (PAV) é mais tolerante à fadiga do que o ligante asfáltico envelhecido a curto prazo (RTFOT). O mesmo resultado pôde ser observado para todos os teores de PPA utilizados. Logo, o enrijecimento provocado pelo envelhecimento termo-

oxidativo do ligante asfáltico é benéfico à tolerância à fadiga para os níveis de tensão usados no ensaio.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo apresentar uma atualização acerca dos desenvolvimentos recentes em ensaios para avaliar a fadiga de ligantes asfálticos. Foram apresentados a fundamentação teórica e o protocolo de dois ensaios de fadiga: a varredura de tempo (*time*

sweep) e a varredura de amplitude linear (LAS). A título de ilustração, foram apresentados resultados de caracterização de ligantes

asfálticos puros e modificados utilizando tais procedimentos.

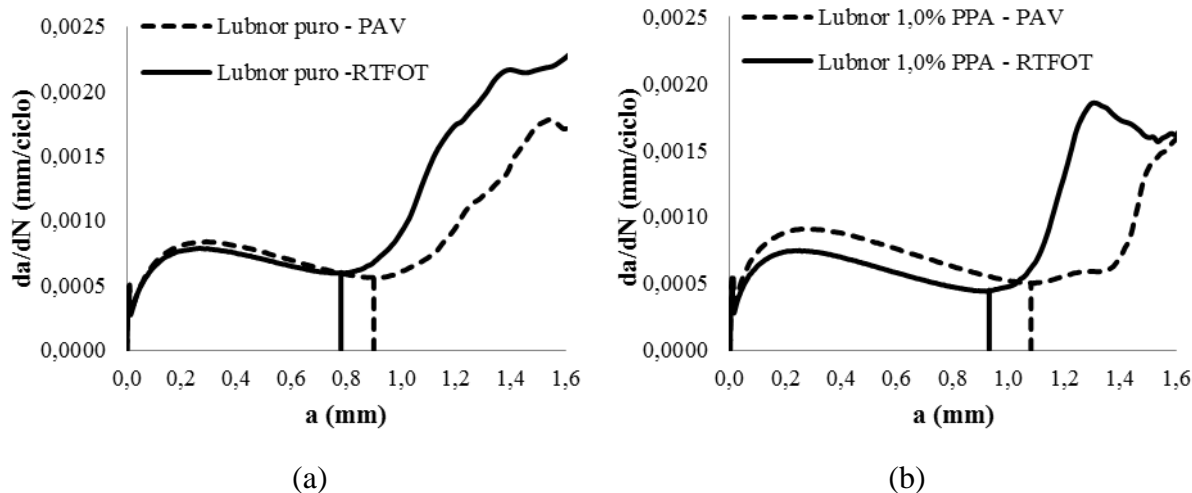


Figura 8 - Variação do comprimento da trinca em relação ao número de ciclos versus o comprimento da trinca (a) CAP LUBNOR puro e (b) CAP LUBNOR + 1,0% PPA envelhecido no RTFOT e PAV, a 25°C

O ensaio de varredura de tempo é tido como um ensaio verdadeiro de fadiga, na extensão em que solicita o material sucessivamente, provocando o consumo de $1/N$ da sua vida (N) de fadiga. Por ser um ensaio feito sob um nível fixo de deformação, é possível impor à amostra níveis de deformação compatíveis com os que ocorrem em uma dada estrutura de pavimento. Por outro lado, é um ensaio que pode exigir tempos prolongados, especialmente para ligantes asfálticos modificados, como nos casos apresentados aqui. A título de ilustração, o ensaio com a amostra CAP+EVA teve duração de aproximadamente 6 horas. O nível de tensão aplicado à amostra, a frequência de aplicação de carga e a temperatura são variáveis fundamentais sobre o tempo de ensaio.

Os resultados do ensaio de varredura de tempo, executado com o CAP REPLAN puro, o CAP+PPA, o CAP+EVA e o CAP+SBR, mostraram como a modificação pode aumentar expressivamente a vida de fadiga dos ligantes asfálticos e em intensidades diferentes conforme o tipo de modificador. O CAP+EVA é o que apresentou maior resistência à fadiga, seguido pelo CAP+SBR e finalmente pelo CAP+PPA. O CAP+EVA apresentou resistência à fadiga substancialmente superior ao CAP puro, resistindo 15 vezes mais ciclos até a falha em comparação com o CAP puro.

O ensaio de varredura de amplitude (LAS) não é, a rigor, um ensaio de fadiga e sim

um ensaio acelerado de fadiga em que se avalia a tolerância do material ao processo de fadiga. Possibilita a realização de duas análises para a quantificação da tolerância ao dano: (1) a definição do modelo de fadiga com base em propriedades reológicas usando a teoria do dano contínuo viscoelástico e (2) o índice de tolerância ao dano calculado com base nos resultados da varredura de amplitude de deformação, entretanto, esta última análise não é levada em consideração na última atualização da norma do ensaio (AASHTO TP 101-14).

No exemplo apresentado, os ajustes dos modelos de fadiga revelaram um efeito claro do ácido polifosfórico sobre a vida de fadiga do ligante asfáltico. A adição de PPA aumenta o parâmetro A, o que se reflete em uma maior integridade do material ante o processo de fadiga, e diminui o parâmetro B, o que se reflete em uma menor sensibilidade do material ao aumento do nível de deformação. Tais benefícios aumentam à medida que se aumenta o teor de PPA.

De posse dos modelos de fadiga para cada material, é possível avaliar o efeito do nível de deformação a que estará sujeito o pavimento sobre o efeito da adição de PPA ao ligante asfáltico: a adição de PPA é favorável apenas quando o pavimento estiver sujeito a pequenas deformações (condição típica de pavimentos com comportamento deflectométrico mais próximo do rígido). Pavimentos flexíveis sujeitos a

grandes deformações não seriam beneficiados pela adição de PPA ao ligante asfáltico, uma vez que se verifica redução da vida de fadiga com o aumento da proporção de PPA adicionada ao ligante asfáltico. Efeito similar é observado para as amostras sujeitas a envelhecimento a longo prazo, seja o CAP puro ou os ligantes asfálticos modificados com PPA.

O parâmetro a_f , usado na análise do índice de tolerância ao dano, é uma medida do comprimento da trinca, representativa do processo de dano da amostra, no momento da ocorrência da falha. A lógica do parâmetro é que quanto maior o comprimento da trinca, mais tolerante o material é à falha por fadiga. Os comprimentos da trinca na falha (a_f) no ensaio LAS indicaram, para os níveis de deformação empregados, que a adição de PPA ao ligante asfáltico da LUBNOR aumentou a tolerância deste material à fadiga e que este aumento é proporcional ao teor de PPA. Os resultados do ensaio LAS também mostraram que o envelhecimento a longo prazo (PAV) aumentou a tolerância à fadiga do CAP LUBNOR puro e do CAP+PPA, demonstrando que o envelhecimento oxidativo pode ser favorável à fadiga do material.

O ensaio de varredura de tempo, embora seja considerado um ensaio verdadeiro de fadiga, pode ser muito prolongado, a depender do tipo de ligante asfáltico, o que poderia inviabilizar sua incorporação a especificações de ligantes asfálticos. No entanto, tal argumento teria pouca validade quando se comparam tais tempos de ensaio aos tempos necessários às práticas de envelhecimento vigentes na especificação Superpave para ligantes asfálticos ou mesmo quando comparados a ensaios em misturas asfálticas, como os de vida de fadiga, que eventualmente podem decorrer dias. Já o ensaio de amplitude linear (LAS) é menos demorado e permite o ajuste de um modelo de fadiga, o que proporciona uma análise da vida de fadiga para uma ampla gama de níveis de deformação do pavimento.

Em face ao detalhamento feito ao longo deste artigo, conclui-se que ambos os ensaios são ferramentas promissoras na avaliação das características de fadiga de ligantes asfálticos. Em virtude das suas potencialidades, recomenda-se a difusão destes ensaios, visando aumentar o nível de conhecimento sobre o comportamento à fadiga do ligante asfáltico, em particu-

lar dos ligantes asfálticos modificados. Recomenda-se também a realização de ensaios de fadiga em misturas asfálticas e de avaliações de campo, visando obter correlações entre as propriedades de fadiga do ligante asfáltico e o comportamento à fadiga das misturas asfálticas. Recomenda-se ainda a realização destes ensaios em diversas temperaturas, tendo em vista a grande influência desta variável sobre as características de fadiga dos ligantes asfálticos. Alternativamente, recomenda-se a realização destes ensaios em condições de isorrigidez ou isomódulo, de maneira a comparar as características de fadiga dos materiais com base em níveis iniciais equivalentes de rigidez.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos ao primeiro e ao segundo autores, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão ao terceiro autor do Auxílio à Pesquisa Jovem Pesquisador (processo n.º. 2006/55835-6) e ao Centro de Pesquisa em Asfaltos Modificados (*Modified Asphalt Research Center* – MARC) da Universidade de Wisconsin – Madison, em particular ao Prof. Husain U. Bahia, pelo estágio-visita proporcionado à primeira autora.

REFERÊNCIAS

- Anderson, D. A.; Y. M. Le Hir; M. O. Marasteanu, J.-P. Planche; D. Martin e G. Gauthier (2001) Evaluation of Fatigue Criteria for Asphalt Binders. *Transportation Research Record*. Washington, n. 1766, p. 48-55. DOI:10.3141/1766-07
- Bahia, H. U.; D. I. Hanson; M. Zeng; M. Zhai; M. A. Khatri e R. M. Anderson (2001) *Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design*. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 459, Washington, D.C.
- Bahia, H. e D. A. Anderson (1995) Strategic Highway Research Program Binder Rheological Parameters: Background and Comparison with Conventional Properties. *Transportation Research Record*. Washington, n. 1488, p. 32-39.
- Bolotin, V. V. (1999) *Mechanics of Fatigue*. CRC Mechanical Engineering Series, Editor Frank A. Kulachi, University of Minnesota, Minneapolis.
- Bonnetti, K. S.; N. Kitae e H. U. Bahia (2002) Measuring and Defining Fatigue Behavior of Asphalt Binders. *Trans-*

portation Research Record. Washington, v. 1810, p. 33-43. DOI: 10.3141/1810-05

Ghuzlan, K. A. e S. H. Carpenter (2000) Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue Testing. *Transportation Research Record*. Washington, n. 1723, p. 141–149. DOI: 10.3141/1723-18

Harvey, J. e B. W. Tsai (1997) Long-Term Oven-Aging Effects on Fatigue and Initial Stiffness of Asphalt Concrete. *Transportation Research Record*. Washington, n. 1590, p.89-98. DOI: 10.3141/1590-11

Hintz, C. (2012) *Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue*. Ph.D Thesis. University of Wisconsin - Madison, Madison.

Hintz, C.; R. Velasquez, L. Zhijun e H. U. Bahia (2011) Effect of Oxidative Aging on Binder Fatigue Performance. *Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 80, p. 527-548.

Johnson, C. M. (2010) *Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance using an Accelerated Test Method*. Ph.D Thesis. University of Wisconsin - Madison, Madison.

Martins A. T (2014) *Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

Martono, W.; H. U. Bahia e J. D'Angelo (2007) Effect of testing geometry on measuring fatigue of asphalt binders and mastics. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.

19, n. 9, p. 746-752. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(746).

Núñez, J. Y. M. (2013) *Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo*. Dissertação de mestrado Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.

Pamplona, T. F. (2013) *Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes*. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.

Pronk, A. C. e E. P. C. Hopman (1990) *Energy Dissipation: The Leading Factor of Fatigue*. Highway Research: Sharing the Benefits. In: Conference of U.S. SHRP, London, Telford, London, p. 225–267.

Pronk, A.C. (1995) *Evaluation of the Dissipated Energy Concept for the Interpretation of Fatigue Measurements in the Crack Initiation Phase*. Road and Hydraulic Engineering Division, the Netherlands.

Shenoy, A. (2002) Fatigue Testing and Evaluation of Asphalt Binders using the Dynamic Shear Rheometer. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 30, n. 4, p. 03-312. DOI: 10.1520/JTE12320J

Vallerga, B.; F. N. Finn e R. G. Hicks (1972) *Effect of Asphalt Aging on the Fatigue Properties of Asphalt Concrete*. Third International Conference on Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, p. 595-617.