

AVALIAÇÃO DE PARÂMETRO DE RESISTÊNCIA À FADIGA PARA LIGANTES ASFÁLTICOS BASEADO NA MECÂNICA DA FRATURA

Daniela Corassa Garcia

Adalberto Leandro Faxina

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

Estudos na escala do ligante asfáltico fornecem importantes indicadores do comportamento à fadiga da mistura asfáltica. Ensaios e parâmetros de fadiga para ligantes asfálticos foram desenvolvidos como alternativas ao parâmetro da especificação Superpave (*Superior Performing Pavements*), mas apresentam limitações. Nuñez *et al.* (2016) observaram que o índice de tolerância ao dano (a_f) do ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS) se mostrou ineficiente para determinar o ponto de falha em alguns asfaltos modificados e Nuñez *et al.* (2016) sugeriram uma abordagem baseada na Mecânica da Fratura Elástico-Linear (MFEL). O objetivo deste trabalho é avaliar o parâmetro de resistência à fadiga baseado na MFEL quanto à aplicabilidade e representação do comportamento à fadiga. Resultados de ensaios LAS e *Time Sweep* (TS) serão empregados no estudo. Também será analisada a possibilidade de ocorrência de instabilidade da amostra e falha de aderência entre a amostra e o aparelho.

1. PROPOSTA

1.1. Abordagem do problema

É consenso que o parâmetro $G^*.sen\delta$ da especificação Superpave não é eficiente na tarefa de mensurar as mudanças das propriedades reológicas do ligante asfáltico sob cargas cíclicas. Ensaios e parâmetros de resistência à fadiga foram propostos, entre eles o *Time Sweep* (TS), proposto por Bahia *et al.* (2001a), e o *Linear Amplitude Sweep* (LAS), proposto por Johnson (2010). Hintz (2012) propôs modificações ao protocolo de ensaio LAS e sugeriu um método de análise dos resultados baseado em um modelo de fratura, com adoção do índice a_f .

Segundo Nuñez (2013), o índice a_f apresenta limitações quanto à sua aplicação a alguns asfaltos modificados. Nuñez *et al.* (2016) sugeriram a adoção de uma abordagem baseada na Mecânica da Fratura Elástico-Linear (MFEL). Apesar de apresentar boa correlação com os resultados do ensaio TS, a aplicação dessa abordagem a uma variedade maior de materiais e temperaturas será utilizada para validar, de maneira mais consistente, os resultados promissores obtidos.

Safaei e Castorena (2016) indicaram posteriormente a possibilidade da amostra apresentar problemas de instabilidade e de perda de aderência do material ao aparelho. No desenvolvimento do parâmetro baseado na MFEL essa restrição não foi considerada. Tal análise permitirá verificar se a faixa de valores indicada por Safaei e Castorena (2016) se aplicará a outros materiais e se o mecanismo de dano por fadiga foi devidamente representado.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desse trabalho é avaliar a aplicabilidade do parâmetro de fadiga baseado na MFEL aos resultados do ensaio de varredura de amplitude linear (LAS) de uma gama de ligantes e mástiques asfálticos, de modo a validar o uso do parâmetro como método de análise alternativo para este ensaio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O mecanismo de dano por fadiga

No pavimento asfáltico, o trincamento por fadiga é provocado pela repetição das cargas do tráfego em baixas e médias temperaturas e pode ser considerado o mecanismo de ruptura mais

recorrente e difícil de mensurar (BONNETTI *et al.*, 2002; SHENOY, 2002). O fenômeno se inicia por meio de fratura adesiva (na interface asfalto agregado mineral) ou coesiva (na escala do ligante asfáltico), sendo influenciado de forma considerável pelas características do ligante e/ou do mástique asfáltico. A ocorrência desse fenômeno tem sido estudada por diversos pesquisadores por meio de diferentes abordagens, na tentativa de tornar o processo mais claro e previsível e, assim, promover um melhor desempenho das estruturas e o conhecimento adequado da vida útil delas (BENEDETTO *et al.*, 2004; GHUZLAN; CARPENTER, 2006; INSTITUTE OF TRANSPORTATION STUDIES, 1994; KIM *et al.*, 2006).

Tendo em vista a grande influência que as propriedades do ligante asfáltico exercem sobre o comportamento à fadiga das misturas asfálticas (BAHIA *et al.*, 2001a; SOENEN *et al.*, 2003), a utilização de ensaios de fadiga para obtenção de parâmetros de fadiga em ligantes e mástiques asfálticos representa uma alternativa útil e prática nas tarefas de comparar e selecionar materiais. Por esta razão, as propriedades reológicas passaram a ser empregadas na caracterização dos ligantes asfálticos e na elaboração de critérios de desempenho para especificações.

2.2. Ensaios e parâmetros de fadiga para ligantes asfálticos

A especificação Superpave adota como critério de fadiga o parâmetro $G^*.sen\delta$ (ANDERSON; KENNEDY, 1993). Estudos posteriores indicaram que esse critério não seria apropriado para a caracterização de ligantes asfálticos, principalmente no caso dos asfaltos modificados. O parâmetro se mostrou ineficiente na determinação das mudanças das propriedades do ligante sob cargas cíclicas, pois sua determinação é feita na região de viscoelasticidade linear, ou seja, sob pequeníssimas deformações, quando o fenômeno ocorre sob grandes deformações, isto é, na região de viscoelasticidade não-linear (BAHIA *et al.*, 2001a; SHENOY, 2002).

Na busca por critérios alternativos, foram propostos diferentes procedimentos e parâmetros para análise do comportamento à fadiga com a utilização do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). Durante o desenvolvimento do projeto NCHRP 9-10 (*National Cooperative Highway Research Program*), foi proposto o ensaio de varredura de tempo (TS), com aplicação de cargas cíclicas repetidas na amostra de ligante asfáltico usando o DSR (BAHIA *et al.*, 2001a). A análise da resistência à fadiga foi feita por meio da relação entre a taxa de energia dissipada e o número de ciclos, de onde é obtido o critério de falha denominado N_p (BAHIA *et al.*, 2001b).

Apesar desse teste demonstrar boa correlação com o desempenho à fadiga de misturas asfálticas (ANDERSON *et al.*, 2001a; BAHIA *et al.*, 2001b; BONNETTI *et al.*, 2002), o ensaio não apresentou boa repetibilidade e sua inserção em especificações se mostrou inviável, em virtude da possibilidade de longa duração do ensaio (ANDERSON *et al.*, 2001; D'ANGELO *et al.*, 2010). Visando obter um procedimento de ensaio rápido para determinação das propriedades reológicas relacionadas à fadiga, ensaios acelerados e outras formas de análise foram propostas (HINTZ; BAHIA, 2013; JOHNSON *et al.*, 2009; MARTONO; BAHIA, 2008). Entre eles, Johnson (2010) propôs a varredura de amplitude linear (LAS), um ensaio que acelera o dano por meio do incremento do nível de deformação imposto à amostra. Essa abordagem utiliza a teoria da mecânica do dano contínuo em meio viscoelástico (VECD) para caracterização do dano por meio da redução na rigidez ($G^*.sen\delta$) e admite que o raio da amostra permanece constante durante o ensaio.

Posteriormente, Hintz (2012) propôs modificações e questionou a abordagem adotada por Johnson (2010), ao verificar, por meio de análise de imagens, que houve redução no raio da amostra. Hintz (2012) assumiu que o início e a propagação de fissuras seriam responsáveis pelo

dano. Essa hipótese embasou a adoção de um método de análise baseado em um modelo de fratura. Nessa abordagem, o parâmetro de fadiga é obtido ao traçar o gráfico de taxa de crescimento da fissura (da/dN) por comprimento da fissura (a), em que o ponto de inflexão corresponderia ao tamanho da fissura na falha, denominado a_f .

O parâmetro proposto por Hintz (2012) apresentou limitações quanto à sua aplicação em ensaios realizados com alguns asfaltos modificados que não apresentaram claramente o ponto de inflexão na curva da/dN versus a . Nestes casos, não seria possível estabelecer um parâmetro de falha do material devido à fadiga por meio dessa abordagem (NUÑEZ, 2013). Nuñez *et al.* (2016) sugeriram a adoção de uma abordagem baseada na MFEL e um parâmetro de análise dado por meio da curva fator de intensidade de tensão (K) versus comprimento da fissura (a). O parâmetro sugerido por Nuñez *et al.* (2016) adota como índice de resistência à fadiga o valor do a para o ponto máximo da curva de K versus a . Após esse ponto, o K apresentaria redução, o que indicaria o início da propagação rápida das fissuras e o ponto de falha.

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1. Materiais

Pretende-se aplicar as análises em questão a asfaltos puros e modificados e a mástiques asfálticos compostos com asfaltos puros e em diferentes relações fíler/asfalto. Dentre os asfaltos a serem avaliados estão: (i) um CAP 50/70, (ii) um CAP 30/45, (iii) dois asfalto-borracha produzidos em laboratório e dois comerciais, (iv) dois asfaltos modificados com SBS produzidos em laboratório e três asfaltos modificados com polímero elastomérico comerciais, (v) dois asfaltos modificados com SBR produzidos em laboratório, (vi) dois asfaltos modificados com polietileno produzidos em laboratório, (vii) dois asfaltos modificados com EVA produzidos em laboratório, (viii) um asfalto modificado com polímero reativo produzido em laboratório, (ix) um asfalto modificado com ácido polifosfórico produzido em laboratório, (x) um asfalto comercial modificado com asfalto natural e polímero elastomérico e (xi) dois asfaltos de alto módulo comerciais.

Dentre os mástiques asfálticos a serem avaliados estão: (i) mástiques preparados com materiais utilizados na composição de cinco misturas asfálticas empregadas na construção de trechos experimentais e (ii) mástiques compostos com materiais empregados em projetos de misturas asfálticas preparadas com CAP 30/45 e oito composições granulométricas distintas. Os mástiques serão preparados em quatro relações fíler/asfalto: 0,00 (asfalto puro), 0,15, 0,30 e 0,45 (em volume), de modo a varrer a faixa de relações f/a comum em misturas asfálticas produzidas no país.

3.2. Método

Os ligantes e os mástiques asfálticos serão envelhecidos a curto e a longo prazos, conforme os procedimentos padronizados de envelhecimento da especificação Superpave, utilizando a estufa de filme fino rotativo (procedimento ASTM D 2872-12e1) e a estufa de vaso pressurizado (procedimento ASTM D 6521-13). Tanto a varredura de tempo quanto a varredura de amplitude linear serão realizadas no reômetro da marca TA Instruments modelo AR2000ex, empregando as amostras envelhecidas e a geometria de placas paralelas de 8 mm de diâmetro com distância de 2 mm entre placas, nas temperaturas de 15, 25 e 35°C. As varreduras de tempo serão realizadas em condições fixas: frequência de 10 rad/s e percentual de deformação de 10%. Os resultados serão analisados com base na teoria de taxa de energia dissipada (DER).

O ensaio de varredura de amplitude linear 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, com incremento linear da deformação, conforme adaptação feita por Hintz *et al.* (2011). Os resultados serão analisados com base na teoria do dano contínuo em meio viscoelástico (modelo de fadiga), no modelo baseado na fratura (parâmetro a_f) e na Mecânica da Fratura Elástico-Linear.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, D. *et al.* Evaluation of Fatigue Criteria for Asphalt Binders. *Transportation Research Record*, v. 1766, n. 1, p. 48–56, 2001.
- ANDERSON, D. A.; KENNEDY, T. W. Development of SHRP binder specification (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 62, 1993.
- ANDERSON, D. *et al.* Low-Temperature Thermal Cracking of Asphalt Binders as Ranked by Strength and Fracture Properties. *Transportation Research Record*, v. 1766, n. 1, p. 1–6, 2001b.
- BAHIA, H. U. *et al.* *NCHRP report 459*. Washington DC: National Academy Press, 2001a.
- BAHIA, H. U. *et al.* Development of binder specification parameters based on characterization of damage behavior (With discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 70, 2001b.
- BENEDETTO, H. *et al.* Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, v. 37, n. 3, p. 202–216, 2004.
- BONNETTI, K.; NAM, K.; BAHIA, H. Measuring and Defining Fatigue Behavior of Asphalt Binders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1810, n. 1, p. 33–43, 2002.
- D'ANGELO, J. *et al.* Development in Asphalt Binder Specifications. *Transportation Research Board*, n. December, p. 1–34, 2010.
- GHUZLAN, K. A.; CARPENTER, S. H. Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures using the dissipated energy approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 33, n. 7, p. 890–901, 2006.
- HINTZ, C. *Understanding mechanisms leading to asphalt binder fatigue*. Madison: The University of Wisconsin, 2012.
- INSTITUTE OF TRANSPORTATION STUDIES. *Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes*. Washington, DC. Strategic Highway Research Program, 1994.
- JOHNSON, C.; BAHIA, H.; WEN, H. Practical application of viscoelastic continuum damage theory to asphalt binder fatigue characterization. *Asphalt Paving Technology-Proceedings*, v. 28, p. 597, 2009.
- JOHNSON, C. M. *Estimating asphalt binder fatigue resistance using an accelerated test method*. MadisonUniversity of Wisconsin, , 2010.
- KIM, Y. *et al.* A simple testing method to evaluate fatigue fracture and damage performance of asphalt mixtures. *Asphalt Paving Technology*, v. 75, 2006.
- MARTONO, W.; BAHIA, H. U. *Developing a surrogate test for fatigue of asphalt binders*. Transportation Research Board 87th Annual Meeting. Anais.2008
- NUÑEZ, J. Y. M. *Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo*. São Carlos: Universidade de São Paulo, 23 ago. 2013.
- NUÑEZ, J. Y. M.; LEONEL, E. D.; FAXINA, A. L. Fatigue characteristics of modified asphalt binders using fracture mechanics. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 154, p. 1–11, mar. 2016.
- SAFAEI, F.; CASTORENA, C. Temperature Effects of Linear Amplitude Sweep Testing and Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2574, p. 92–100, 2016.
- SHENOY, A. Fatigue testing and evaluation of asphalt binders using the dynamic shear rheometer. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 30, n. 4, p. 303–312, 2002.
- SOENEN, H.; DE LA ROCHE, C.; REDELIUS, P. Fatigue behaviour of bituminous materials: from binders to mixes. *Road materials and pavement design*, v. 4, n. 1, p. 7–27, 2003.

Daniela Corassa Garcia (daniela.corassa@usp.br)

Adalberto Leandro Faxina (adalberto@usp.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador Säocarlense ,400 – São Carlos, SP, Brasil