

## COMPORTAMENTO À FADIGA DA MATRIZ DE AGREGADO FINO DE MISTURAS ASFÁLTICAS PREPARADAS COM LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS DE MESMO GRAU DE DESEMPENHO

**Javier Yesid Mahecha Nuñez**

**Adalberto Leandro Faxina**

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

### RESUMO

Métodos e equipamentos têm sido recentemente desenvolvidos para descrever o comportamento à fadiga dos materiais asfálticos usados em pavimentação, porém o entendimento completo dos mecanismos e os efeitos das condições de campo que levam à degradação desses materiais ainda não têm sido bem compreendidos. O objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento à fadiga da matriz de agregado fino (maf) presente na mistura asfáltica completa à luz de um ensaio acelerado de fadiga. A pesquisa inclui avaliações dos efeitos da modificação de ligantes asfálticos, os efeitos da temperatura e o envelhecimento. Duas abordagens para análise do problema são consideradas: a baseada na teoria do dano e outra baseada na mecânica da fratura. Espera-se que os resultados contribuam para uma maior compreensão do processo de trincamento por fadiga e que também seja uma ferramenta de base para o entender o comportamento dos ligantes asfálticos modificados, por parte dos profissionais da área.

### 1. INTRODUÇÃO

O trincamento por fadiga é um dos problemas mais comuns nos pavimentos flexíveis no Brasil e no mundo (Queiróz, 1981). Por esta razão, uma compreensão mais profunda do processo de fadiga nos materiais de pavimentação é essencial para a melhoria da infra-estrutura da rede rodoviária. Uma contribuição para a solução deste problema consiste na avaliação dos materiais asfálticos em laboratório.

Além da complexidade do próprio processo de fadiga, a caracterização do trincamento por fadiga das misturas asfálticas é considerada um desafio devido à quantidade de variáveis que podem intervir no fenômeno, tais como: heterogeneidade do material, volume de vazios, tipo de agregado mineral, tipo de ligante asfáltico, dependência do tempo de aplicação da carga, temperatura, envelhecimento oxidativo no ligante asfáltico e tempo de recuperação para a cicatrização de trincas durante os intervalos de aplicação de carga.

Para entender melhor o desempenho do material à fadiga, têm sido realizados esforços por estudar os componentes da mistura asfáltica por separado com o propósito de avaliar a contribuição que cada um tem no desempenho. Alguns pesquisadores (Bahia *et al.*, 2001; Anderson *et al.*, 2001; Johnson, 2010; Hintz, 2012; Pamplona, 2012; Nuñez, 2013; Martins, 2014) têm focado os seus estudos no componente considerado de maior contribuição no processo de fadiga: o ligante asfáltico. Estudos no ligante asfáltico podem representar a menor escala dos componentes da mistura asfáltica.

Por outro lado, em uma escala maior, os estudos para caracterização à fadiga de misturas asfálticas geralmente são conduzidos em duas esferas: a) matriz de agregado fino: composta por agregado fino (menor que 1,18 mm), fíler (menor que 75µm) e ligante asfáltico, e b) mistura asfáltica completa: agregado fino e gráudo, fíler e ligante asfáltico. O estudo da matriz de agregado fino (MAF) representa uma escala intermediária entre a mistura asfáltica e o ligante asfáltico e tem ganhado importância por acreditar-se que o dano por fadiga começa e se propaga na parte fina da mistura asfáltica. Outro aspecto interessante que motiva o estudo na MAF é que ela possui uma homogeneidade maior que a da mistura asfáltica completa, fazendo com que os

ensaios apresentem menor variabilidade nos resultados quando comparados com os da mistura asfáltica (Coutinho, 2012).

O comportamento à fadiga de misturas asfálticas com base na sua parte fina tem sido objeto de vários estudos (Kim *et al.*, 2002, Castelo Branco, 2008; Coutinho, 2012). A grande maioria das análises feitas na parte fina das misturas asfálticas emprega a abordagem baseada na teoria do dano. Esta abordagem considera que o material apresenta uma degradação ao longo do número de ciclos e o sólido ainda é tratado assumindo-se a hipótese de continuidade. Descontinuidades micro e meso são tratadas por meio de um critério de dano geralmente associado à perda de rigidez.

Johnson (2010) aplicou a teoria do dano contínuo viscoelástico em ensaios de fadiga no ligante asfáltico. A base desta teoria está no incremento do dano viscoelástico inspirado na termodinâmica de processos irreversíveis. Segundo aquela teoria, um material tem determinado potencial para absorver energia externa, seja em termos de deformação ou de energia dissipada devido ao dano. Quando o dano afeta a capacidade do material de recuperar seu estado original o processo não pode ser simplesmente revertido removendo a carga.

Nestas condições, a força disponível para incrementar o dano (i.e, a taxa de dano) pode ser definida como a mudança na energia potencial do material ( $W$ ) com relação à mudança na quantidade de dano ( $D$ ) no material, sendo que esta relação ( $dW/dD$ ) é a força requerida equivalente à disponível para incrementar o dano (Hintz *et al.*, 2011; Johnson, 2010; Schapery, 1990, 1997). Os estudos feitos por Coutinho (2012) verificaram que os ensaios realizados usando este método de ensaio na MAF apresentam ordenamentos similares da vida de fadiga aos obtidos na mistura asfáltica completa.

Outra abordagem do mesmo problema é baseada na mecânica da fratura. Nesta abordagem, é considerado que o fenômeno de fadiga é governado pelo crescimento e propagação de fissuras discretas que provocam a degradação do material. O estudo realizado por Hintz (2012) sugere que os resultados dos ensaios de fadiga em ligantes asfálticos deveriam ser analisados usando modelos baseados na análise da mecânica da fratura, pois é observado que uma fratura de ordem macro acontece durante o ensaio.

Alguns estudos em misturas asfálticas têm sido realizados usando a mecânica da fratura. Soares *et al.* (2003) pesquisaram o modo I de propagação de fissuras em misturas asfálticas usando ensaios de tração indireta. Paulino *et al.* (2004) usaram um modelo da zona coesiva para simular o modo I de fratura de vigas simplesmente apoiadas com entalhe inicial. Aragão *et al.* (2011) apresentaram um modelo computacional da zona coesiva baseado em algumas propriedades dos componentes da mistura asfáltica para descrever a fratura no material.

A pesquisa objeto deste projeto se enquadra na nova linha de pesquisa na matriz de agregado fino, explorando métodos e ferramentas desenvolvidos recentemente e ainda não amplamente aplicadas para o estudo dos materiais locais. Pretende-se assim estudar o comportamento à fadiga da MAF de misturas asfálticas preparadas com ligantes asfálticos do mesmo grau de desempenho. Espera-se chegar a um entendimento mais racional do processo de fadiga nos materiais asfálticos e aproximar as relações MAF - ligante asfáltico, visando no futuro poder estabelecer a contribuição real destes componentes no comportamento da mistura asfáltica.

## 2. OBJETIVO

O objetivo geral desta pesquisa é caracterizar o comportamento à fadiga da matriz de agregado fino de misturas asfálticas preparadas com 12 ligantes asfálticos do mesmo grau de desempenho e o ligante asfáltico de base, utilizando 5 modificadores: ácido polifosfórico (PPA), copolímero de estireno butadieno estireno (SBS), borracha de pneus moída, polietileno (PE), borracha de estireno butadieno (SBR), acetato de etileno vinil (EVA) e Elvaloy. Outros objetivos desta pesquisa são avaliação dos efeitos da temperatura e do envelhecimento na vida de fadiga das MAF preparadas com estas formulações.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Será realizado um programa experimental de ensaios no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) que permita a caracterização à fadiga de MAFs preparadas com 12 formulações de ligantes asfálticos que atinjam a classificação PG 76-XX (i.e., dois graus acima do PG do ligante asfáltico de base, na temperatura alta). As formulações de ligantes CAP+PPA, CAP+SBS, CAP+SBS+PPA, CAP+Borracha, CAP+Borracha+PPA, CAP+PE, CAP+PE+PPA, CAP+EVA, CAP+EVA+PPA, CAP+SBR, CAP+SBR+PPA e CAP+Elvaloy+PPA são preparadas tendo como base um ligante asfáltico 50/70 de classificação PG 64-xx. O agregado de tipo basalto é comum a todas as misturas asfálticas. Os ensaios de fadiga serão realizados em amostras de MAF cilíndricas de 12mm de diâmetro e 50mm de altura extraídas de corpos de prova compactados no compactador giratório Superpave.

Os ensaios serão realizados mediante a aplicação de carregamentos cíclicos reversos com incremento linear de deformação (*Linear Amplitude Sweep-LAS*), similar ao indicado na norma AASHTO TP 101-12-UL. No intuito de avaliar o efeito do envelhecimento, os materiais serão avaliados em duas condições de envelhecimento: curto prazo (utilizando a estufa RTFO) e longo prazo (na estufa PAV). Para simular o efeito do envelhecimento os ligantes asfálticos serão envelhecidos separadamente e posteriormente será feita a composição das MAFs com o agregado mineral. Com o propósito de avaliar os efeitos da temperatura na vida de fadiga o plano experimental contempla a realização dos ensaios nas temperaturas de isomódulo e duas temperaturas 5°C acima e abaixo daquelas temperaturas.

Quanto ao método para a análise dos resultados, duas abordagens pa serão consideradas, a primeira baseada na teoria do dano e a segunda baseada na mecânica da fratura. A primeira abordagem está presente em trabalhos como os de Kim *et al.* (2002) e Castelo Branco (2008), que têm abordado os ensaios de fadiga considerando a MAF por meio da análise dinâmico mecânica (*Dynamic Mechanical Analysis - DMA*). Na mesma linha da teoria do dano, com base no ensaio acelerado LAS proposto por Johnson (2010), é possível obter modelos que estimem a vida de fadiga em qualquer amplitude de deformação por meio de um único ensaio.

Por outro lado, existe outra abordagem baseada nos princípios da mecânica de fratura para analisar a degradação do material produto do crescimento e propagação das fissuras. Neste enfoque, a vida de fadiga, em um determinado estado de tensões, é definida como o período de tempo durante o qual o dano cresce, de acordo com uma lei de propagação de fissuras, de um estado inicial a um nível final crítico. A teoria da mecânica da fratura apresenta soluções que podem ser aplicadas no caso de materiais dúcteis, mediante as considerações da extensão da zona plástica. Para a determinação desta zona, abordagens como as de Irwin (1960) e Dugdale (1960) podem ser adaptadas nas condições geométricas particulares do ensaio.

Com base nestas análises, espera-se indicar as características de fadiga para os ligantes asfálticos aqui analisados, de maneira a obter informações mais precisas da resistência à este

mecanismo de ruptura e da contribuição que cada modificador tem na vida de fadiga. Espera-se contribuir também ao conhecimento dos efeitos da temperatura e do envelhecimento sobre a vida de fadiga dos ligantes asfálticos.

#### Agradecimentos

O primeiro autor agradece à (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos. O segundo autor agradece a FAPESP pela concessão de Auxílio à Pesquisa, na categoria de Jovem Pesquisador (processo nº 2006/55835-6).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, D.A.; M. Yann; L Hir; O. M. Marasteanu; J-P. Planche, D. Martin e G. Gauthier (2001). Evaluation of Fatigue Criteria for Asphalt Binders. *Transportation Research Record*, Washington D.C., v. 1766, p. 48-56.
- Aragão, F. T.; Y-R. Kim; J. Lee (2011) Micromechanical Model for Heterogeneous Asphalt Concrete Mixtures Subjected to Fracture Failure, *Journal of materials in civil engineering-ASCE*, v.23
- Bahia, H. U.; H. Zhai; M. Zeng; Y. Hu e P. Turner (2001). Development of Binder Specification Parameters Based On Characterization Of Damage Behavior (With Discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v.70, p.442-470.
- Castelo Branco, V.T.F. (2008) *A Unified Method for the Analysis of Nonlinear Viscoelasticity and Fatigue Cracking of Asphalt Mixes Using the Dynamic Mechanical Analyzer*. Tese de Doutorado, Texas A&M University. College Station, TX.
- Coutinho R. P. (2012) *Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga* Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Dugdale, D.S. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, V.8, 100-10.
- Hint, C; R. Velasquez; C. Johnson: H. Bahia (2011) Modification and Validation of Linear Amplitude Sweep Test for Binder Fatigue Specification. *Transportation Research Record*. v.2207, Washington D.C p.99,
- Hintz, C. (2012) *Understanding Mechanics Leading to Asphalt Binder Fatigue*. PhD Dissertation. University of Wisconsin, Madison.
- Irwin, G.R. (1960). Plastic zone near a crack and fracture toughness, Proc. 7<sup>th</sup> Sagamore Conf. p. IV-63.
- Johnson, C. M. (2010) *Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using an Accelerated Test Method*, Dissertation, University of Wisconsin, Madison.
- Kim, Y. R.; D. N. Little e R. Lytton (2002) Use of Dynamic Mechanical Analysis (DMA) to Evaluate Fatigue and Healing Potential of Asphalt Binders and Mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* v.71, p. 176-206
- 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, Rio de Janeiro.
- Núñez, J. Y. M. (2013) *Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo*. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Pamplona, T. F. (2013) *Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Paulino, G. H.; S. H. Song e W. G. Buttlar (2004) Cohesive zone modeling of fracture in asphalt concrete. Proc., 5th RILEM Int. Conf. on Cracking in Pavements: Mitigation, Risk Assessment, and Prevention, RILEM Publications SARL, Limoges, France, p. 63-70.
- Queiróz, C.A.V. (1981) *Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil*. PhD Dissertation. The University of Texas at Austin.
- Schapery, R. A. (1990) A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 38(2), p. 215-253.
- Schapery, R. A. (1997) Nonlinear Viscoelastic and Viscoplastic Constitutive Equations Based on Thermodynamics, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, v1, p. 209-240.
- Soares, J. B.; F. A. Freitas e D. H. Allen (2003) Crack modeling of asphaltic mixtures considering heterogeneity of the material, *Transportation Research Record*, Washington D.C., v.1832, p.113-120.

---

Javier Y. M. Núñez (jymahechan@usp.br)

Adalberto L. Faxina (alfaxina@sc.usp.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13560-970, São Carlos, SP

