

## USO DO S-VECD PARA CONSTRUÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE DANO DE MISTURAS ASFÁLTICAS FINAS USANDO ENSAIOS DE VARREDURA LINEAR DE AMPLITUDES DE DEFORMAÇÃO

Reuber Arrais Freire<sup>1</sup>

Renato Peixoto Coutinho<sup>2</sup>

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará

Departamento de Engenharia de Transportes

<sup>2</sup>Louisiana State University

Department of Petroleum Engineering

### RESUMO

Vários autores têm utilizado a Matriz de Agregados Finos (MAF) como passo intermediário na previsão do comportamento de misturas asfálticas. Recentemente, diversos autores estão abordando a mecânica do dano contínuo (do inglês *Viscoelastic Continuum Damage* - VECD) na caracterização do dano por fadiga em misturas asfálticas. Neste tipo de abordagem, as trincas são consideradas homogêneas, e estas são avaliadas a partir de variáveis internas de estado, determinadas experimentalmente. A partir desta abordagem, surgiu uma proposta de teste acelerado para caracterização de ligantes asfálticos com relação ao dano por fadiga, chamado *Linear Amplitude Sweep* (LAS). Este trabalho tem por objetivo principal a utilização do LAS para a caracterização da escala MAF, utilizando o modelo simplificado (S-VECD) para a construção das curvas características de dano destes materiais. A partir dos resultados foi concluído que é possível construir curvas características de dano para MAFs com diferentes Tamanhos Máximos Nominais (TMN), porém não é possível prever a vida de fadiga, uma vez que o protocolo desse teste (LAS) não leva as amostras à ruptura a partir do uso de reômetros convencionais, que no geral possuem capacidade de torque reduzida diante da rigidez deste tipo de material.

### ABSTRACT

Several authors have used the Fine Aggregate Matrix (FAM) as an intermediate step for predicting the asphalt mixtures behavior. Recently, some authors are using the viscoelastic continuum damage (VECD) approach in fatigue damage characterization of asphalt mixtures. In this approach, cracks are considered to be homogeneous, and they are depicted as internal state variables, determined experimentally. From this approach, an accelerated test was proposed for asphalt binders' characterization with respect to fatigue damage, called linear amplitude sweep (LAS). This work aims to use the LAS test to characterize MAF, using the simplified model (S-VECD) for damage characteristic curves construction. From the results it was concluded that it is possible to construct damage characteristic curves to the FAM with different maximum nominal sizes (MNS), but it is not possible to predict the fatigue life, since the LAS test protocol does not reach failure with the use of conventional rheometers, considering its torque capability and the samples stiffness.

## 1. INTRODUÇÃO

As Matrizes de Agregados Finos (MAF) têm sido utilizadas como passo intermediário para a caracterização de misturas asfálticas desde 2003 (Kim *et al.*, 2003). Este tipo de mistura contém apenas parte da parcela fina da granulometria de uma mistura asfáltica convencional, como ilustrado na Figura 1. Enquanto a mistura asfáltica, geralmente, é resultante da combinação de agregados graúdos, miúdos, filer e ligante asfáltico, a MAF é a combinação de parte dos agregados miúdos, filer e ligante asfáltico. A utilização desse tipo de mistura propõe que a caracterização mecânica seja primeiramente realizada na escala MAF, que tem uma estrutura interna relativamente mais uniforme em comparação a mistura asfáltica completa. A uniformidade da estrutura interna desses materiais em relação ao Concreto Asfáltico (CA)

possibilita uma caracterização mais precisa dos mesmos em laboratório. A qualidade do mástique (interação físico-química do ligante asfáltico com o material de enchimento, passante na peneira #200) e da MAF exercem influência no desempenho das misturas asfálticas (Coutinho, 2012).



**Figura 1:** Ilustração da Matriz de Agregados Finos (MAF)

Estudos com o uso de modelagem multiescala têm se tornado comum (Karki, 2010; Lutfi, 2011). Nesta abordagem, as propriedades da mistura asfáltica são obtidas (simuladas) a partir das propriedades de diferentes escalas. A MAF tem um papel fundamental nesse processo por representar a parcela viscoelástica da mistura asfáltica. Além disso, existem ainda trabalhos onde a MAF é utilizada para a modelagem microestrutural de materiais asfálticos (Aragão, 2011, Aragão *et al.*, 2012; 2013). Uma das questões existentes na literatura, com relação ao uso da MAF como ferramenta para a caracterização de misturas asfálticas, é referente à escolha da peneira que limita o Tamanho Máximo Nominal (TMN) dos agregados utilizados nessas misturas. Alguns autores (Kim *et al.*, 2003; Zollinger, 2005; Arambula *et al.*, 2007; Masad *et al.*, 2007; Caro *et al.*, 2008; Castelo Branco, 2008; Vasconcelos *et al.*, 2009; Aragão, 2011; Pavaldi *et al.*, 2012; Tong, 2013) ao moldar amostras de MAF definiram a peneira #16 (1,18mm) como sendo o limite superior. Dai *et al.* (2007) e Aragão *et al.* (2010) utilizaram peneiras de tamanhos diferentes para separar a parte graúda da parte miúda da mistura asfáltica, 2,36mm e 0,6mm, respectivamente. No Brasil, a maior parte das pesquisas desenvolvidas utilizando MAFs usa a peneira #10 (2,00mm) pelo fato da peneira #16 não pertencer à série de peneiras normatizadas no país.

Para a caracterização do dano por fadiga em misturas asfálticas, muitos autores utilizam escalas menores, como o ligante asfáltico ou a MAF, como ferramenta para prever o comportamento da mistura asfáltica. Essas escalas apresentam a vantagem de serem mais homogêneas se comparadas às misturas asfálticas, além de consumirem menos material e requererem menor tempo de ensaio (Tsai e Monismith, 2005). Outra vantagem é relacionada ao equipamento utilizado para a realização do ensaio, uma vez que as misturas asfálticas são mais rígidas e, portanto, exigem equipamentos com maiores capacidades de carregamento para que, durante os ensaios cíclicos, seja possível conduzir o material até a ruptura.

Recentemente, diversos autores estão abordando a mecânica do dano contínuo (do inglês *viscoelastic continuum damage* - VECD) para a caracterização do dano por fadiga em misturas asfálticas (Daniel e Kim, 2002; Babadopulos *et al.*, 2014; Martins, 2014; Nascimento *et al.*, 2014). Neste tipo de abordagem, as trincas são consideradas homogêneas e estas são retratadas a partir de variáveis internas de estado, determinadas experimentalmente (Schapery, 1990a, 1990b; Park *et al.*, 1996). A partir desta abordagem, Johnson e Bahia (2010) propuseram uma metodologia de ensaio acelerado em ligantes asfálticos, para a obtenção da tolerância ao dano dos mesmos. Os autores chamaram o ensaio de varredura linear de amplitude de deformação (do inglês, *linear amplitude sweep* - LAS *test*). A partir deste trabalho, Johnson (2010) seguido por Hintz *et al.* (2011) e Hintz *et al.* (2013) propuseram melhorias na metodologia de ensaio, e de análise dos resultados. Hintz *et al.* (2013) também alteraram a abordagem utilizada na análise dos resultados dos ensaios com relação a proposição do uso de parâmetros de fratura devido a formação de uma macro trinca periférica que surge na amostra de ligante asfáltico, chamando este novo ensaio de LAS modificado.

No Brasil, Pamplona (2013) utilizou o LAS e o LAS modificado na caracterização de ligantes asfálticos. A autora modificou o ligante asfáltico com diferentes percentuais de ácido polifosfórico e investigou o efeito do envelhecimento com respeito à rigidez, à deformação permanente e à tolerância ao dano destes materiais. Ainda para a escala ligante, Martins (2014) também usou o LAS e o LAS modificado para caracterizar ligantes asfálticos com relação à tolerância ao dano, e comparou os resultados com aqueles obtidos durante a caracterização da mistura asfáltica. A autora concluiu através da concordância dos resultados obtidos para as duas diferentes escalas, que o LAS poderia ser utilizado como forma da caracterização do dano por fadiga. Na literatura internacional, Willis *et al.* (2013) conduziram um estudo para avaliar a influência da adição de ligante asfáltico virgem em misturas asfálticas com elevados percentuais de material fresado, com relação a tolerância ao dano de ligantes asfálticos, utilizando o LAS na caracterização. Zhou *et al.* (2013) utilizaram o LAS para avaliar a tolerância de ligantes asfálticos ao dano e correlacionar os resultados com o comportamento da mistura asfáltica.

Coutinho (2012) adaptou o método de ensaio LAS proposto por Johnson (2010), considerando as modificações sugeridas por Hintz *et al.* (2011), para a caracterização de MAFs. Os resultados obtidos através do uso do LAS foram comparados com os resultados obtidos através do ensaio de varredura de tempo. A maior diferença encontrada foi da ordem de 15%, justificando o uso do LAS em detrimento do ensaio de varredura de tempo (que demanda mais tempo). Coutinho *et al.* (2013) argumentam a favor do uso do LAS em MAFs, devido ao fato de que as deformações que ocorrem na periferia da amostra são pequenas, não invalidando, assim, a hipótese das pequenas deformações assumida pela teoria da mecânica do dano contínuo.

Recentemente, Underwood *et al.* (2012) propuseram uma simplificação na abordagem do modelo VECD para análise de misturas asfálticas. Os citados autores chamaram o modelo de *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD). Esse modelo, basicamente, usa o princípio da correspondência elástica-viscoelástica proposto por Schapery, substituindo a deformação pela pseudo-deformação (tensão viscoelástica linear dividida por um módulo de referência) transformando o comportamento viscoelástico do material em comportamento linear. Esta é uma manobra matemática para separar os efeitos viscoelásticos daqueles gerados pelo dano. A

inclinação da curva formada trata-se da pseudo-rigidez ( $C$ ), que é relacionada à integridade do material. A partir da variação do tempo e da pseudo-rigidez durante o ensaio, a variável interna de estado de dano ( $S$ ) pode ser obtida analiticamente. Daniel e Kim (2002) perceberam que, quando plotados os valores de  $C$  vs  $S$  durante o ensaio cíclico, a curva formada era a mesma independente das condições de carregamento para uma mesma mistura asfáltica. Portanto, esse tipo de curva é chamado de curva característica de dano, e é uma propriedade fundamental da mistura asfáltica, de acordo com os autores citados anteriormente. Safaei *et al.* (2014) avaliaram o S-VECD para resultados de ensaios torcionais em ligantes asfálticos, através do ensaio LAS, enquanto Karki (2014) realizou primeiro trabalho utilizando este modelo na escala MAF, através de ensaios de varredura de tempo, em testes uniaxiais e torcionais à diferentes frequências de carregamento. As curvas características de dano obtidas para os ensaios à diferentes condições de carregamento coincidiram endossando a hipótese que sugere que essa curva é uma propriedade fundamental do material. O objetivo do presente trabalho é construir curvas características de dano ( $C$  vs  $S$ ) usando ensaios LAS para a escala MAF com diferentes TMN.

## 2. INFORMAÇÕES EXPERIMENTAIS

### 2.1. Materiais

Para o desenvolvimento da presente pesquisa, duas MAFs foram dosadas a partir do método proposto por Coutinho *et al.* (2011). Com relação a granulometria, as MAFs variaram com relação aos seus TMNs (1,18mm e 2,00mm). Os agregados utilizados nesse estudo são naturais, proveniente de diferentes pedreiras localizadas no Ceará, e de diferentes origens mineralógicas: (i) gnáissica e (ii) fonolítica. Foram usados como agregados graúdos as britas 1/2" e 3/8", como agregado miúdo o pó de pedra, e, ainda, a areia de campo proveniente do sítio Maninho localizado na cidade de Maracanaú - CE e como material de enchimento o filer natural. Algumas características dos agregados utilizados estão descritas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Características dos agregados utilizados no estudo

Agregado	Origem Mineralógica	Densidade Real	Densidade Aparente	Absorção (%)	Utilização na mistura asfáltica (%)
Brita 1/2"	Fonolítica	2,47	2,43	0,9	23
Brita 3/8"	Fonolítica	2,49	2,43	1,1	30
Pó de Pedra	Gnáissica	2,72	-	-	22
Areia	-	2,64	-	-	25

Foi utilizado um Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) caracterizado por penetração como CAP 50/70, de acordo com as especificações brasileiras regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2005). O ligante asfáltico é um produto derivado do petróleo brasileiro proveniente do Campo Fazenda Alegre, no Espírito Santo, e processado na refinaria Lubnor da Petrobras. Este CAP foi também caracterizado pela especificação Superpave como PG 70-XX.

A mistura asfáltica foi dosada de acordo com a metodologia Superpave com 100 giros e Vv de 4%. A partir da granulometria da mistura asfáltica, duas curvas granulométricas de MAFs foram geradas, variando o TMN das mesmas. Estas curvas foram obtidas através do

reproporcionamento da curva original da mistura asfáltica considerando apenas a porção fina da granulometria. A Figura 2 apresenta as granulometrias do Concreto Asfáltico (CA) e das MAFs. O teor de CAP utilizado nas amostras é definido com base nos resultados dos ensaios de granulometria (DNER-ME 083-98) e de extração de ligante asfáltico (DNER-ME 053-94). A amostra de MAF é obtida utilizando um misturador de escala laboratorial sendo em seguida resfriada. O procedimento de resfriamento é minucioso, a fim de evitar a formação de grumos de agregados miúdos com ligante asfáltico e de agregados graúdos envolvidos por agregados miúdos aderidos. Ao fim da preparação, têm-se agregados minerais, provenientes do CA, misturados ao ligante asfáltico na forma solta, sem a completa aglutinação entre as partículas. Em seguida, cada amostra é submetida ao fracionamento na peneira que delimitará o TMN das MAFs. Após o fracionamento, a amostra estará dividida em duas frações: graúda e miúda. A ideia central desse método de dosagem é obter o percentual de ligante asfáltico contido na parcela miúda da mistura. Esse percentual é obtido através de extração de ligante asfáltico e do refractionamento do material a fim de se obter o percentual de agregado miúdo aderido ao agregado graúdo antes da extração. Esse percentual obtido é o teor de projeto de ligante asfáltico da MAF. Maiores detalhes sobre o procedimento descrito acima podem ser encontrados em Coutinho (2012). A Figura 3 ilustra este procedimento.

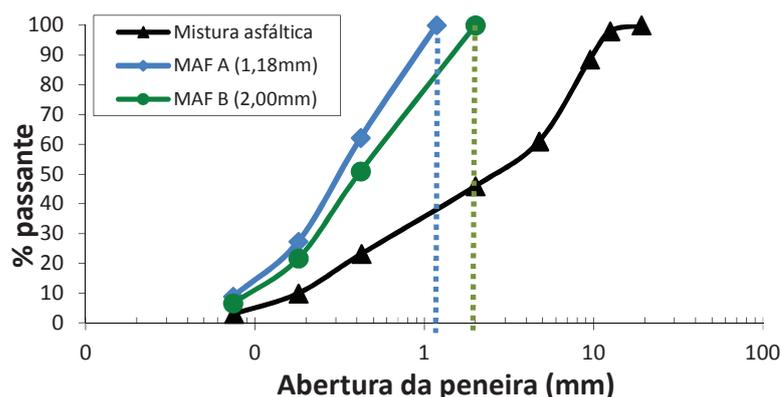


Figura 2: Granulometrias do CA e das MAFs analisadas nesse estudo

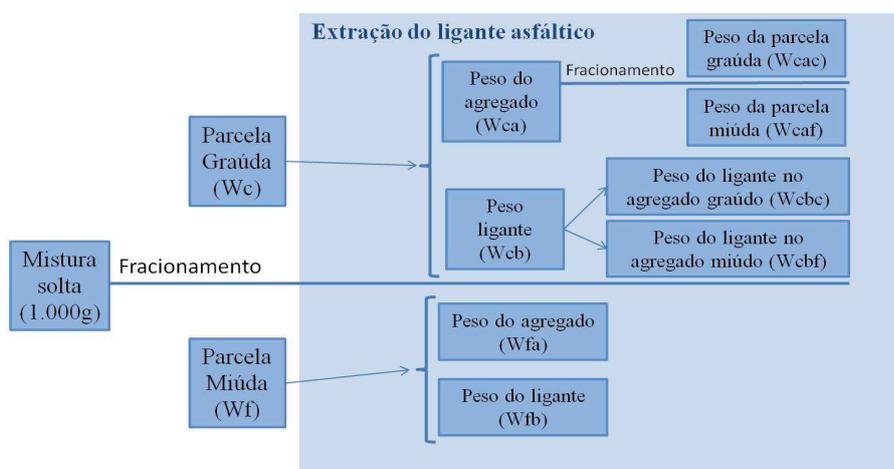


Figura 3: Fluxograma de dosagem das MAF

As dosagens das MAFs resultaram em percentuais diferentes de ligante asfáltico para cada mistura com diferente TMN. A medida que se diminui o TMN dos agregados minerais, aumentando a quantidade de finos e a área de superfície específica das partículas, maiores teores de CAP são requeridos (Karki, 2010). Detalhes dos resultados das dosagens estão descritos em Freire *et al.* (2014). A Tabela 2 apresenta a matriz experimental utilizada.

**Tabela 2:** Matriz experimental utilizada no presente trabalho

MAF	Peneira (#)	TMN (mm)	%CAP	G <sub>mm</sub>	V <sub>v</sub> (%)
A	16	1,18	10,3	2,298	4,0
B	10	2,00	8,9	2,328	4,0

## 2.2. Preparação das Amostras de MAF

O procedimento de obtenção de amostras de MAF segue os mesmos descritos em Zollinger (2005), Castelo Branco (2008) e Coutinho (2012). Amostras com 80mm de altura foram compactadas no Compactador Giratório Superpave (CGS), para em seguida serem submetidas a um procedimento de serragem e de extração. Na sequência do procedimento, foram serrados topo e base de forma que a altura final do CP seja 50mm. Por fim, as amostras foram extraídas utilizando uma furadeira de bancada acoplada a um *drill* com diâmetro interno de 12mm, de forma a obter amostras com este diâmetro. De posse das amostras extraídas na geometria necessária para a realização do ensaio, *holders* metálicos foram colados no topo e na base das amostras utilizando cola epóxi. Estes *holders* são necessários para acoplar a amostra no equipamento e permitir a aplicação da carga pelo DSR.



(a) Extração das amostras



(b) Amostras extraídas



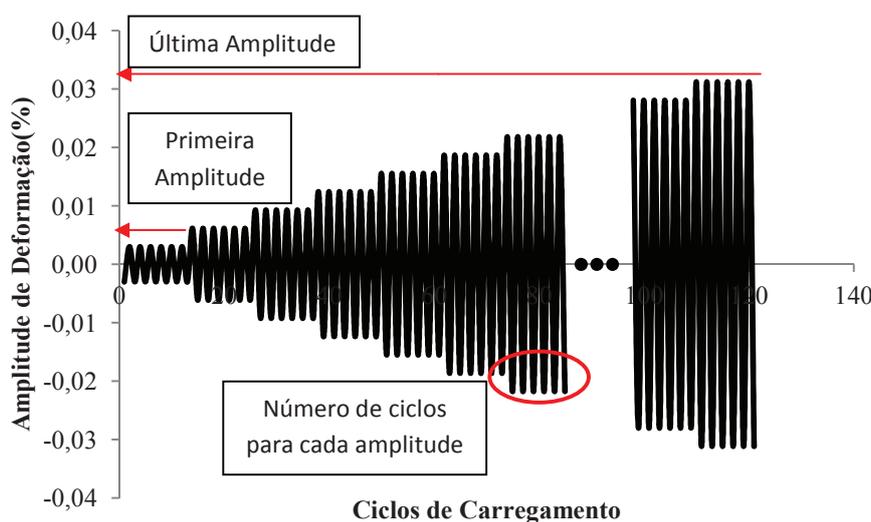
(c) *Holder*s metálicos

**Figura 4:** Obtenção e preparação de amostras de MAF

## 2.3. Procedimentos Experimentais

Os ensaios para caracterização das MAFs foram conduzidos no DSR, modelo TA AR 2000®. Esse equipamento é capaz de aplicar torques de 0,1 até 200mN.m e frequências entre  $1,2 \times 10^{-7}$  e 100Hz, além de possuir uma câmara para controle de temperatura podendo ir de -160 até 600°C. A primeira etapa trata-se de varreduras de frequência para a obtenção de propriedades viscoelástica lineares, que são *inputs* do modelo. Durante o ensaio, deformações na ordem de 0,0065% são aplicadas, de forma a garantir inexistência de dano durante os ensaios, nas temperaturas de 10; 20; 30; 40; 50; e 60°C e nas frequências variando de 0,1 a 25Hz. Os

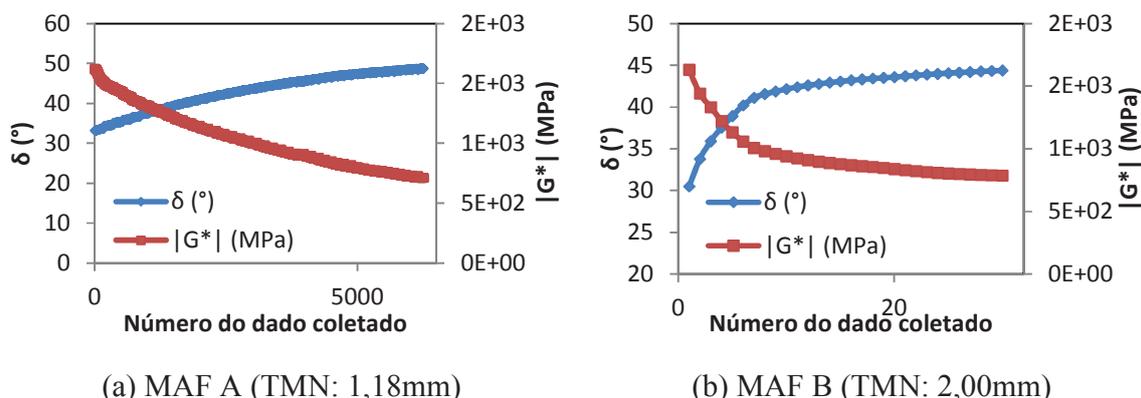
resultados dessa caracterização podem ser encontrados em Freire (2015). O ensaio LAS seguiu a norma AASHTO TP 101 (2014) com sugestões da adaptação para MAF propostas por Coutinho (2012). Este teste é realizado em duas etapas: 1) *fingerprint*, que se trata de uma varredura de frequência necessária para calcular o parâmetro  $\alpha$  do modelo S-VECD; e 2) varredura linear de amplitude de deformação (LAS). A primeira etapa foi realizada na temperatura de 25°C, na frequência de 10Hz, numa variação de frequências de 0.2 a 30Hz, e com um nível de deformação de 0,0065%. A segunda etapa é realizada através de uma combinação de varreduras de tempo, com incrementos lineares de deformação, onde a primeira amplitude é de 0,0065% (amplitude que resulta em comportamento linear), e a última amplitude é relacionada à capacidade de torque do equipamento para aplicação de tensão. Esta etapa também é realizada na temperatura de 25°C e na frequência de 10Hz. A Figura 5 apresenta a ilustração do carregamento para este tipo de ensaio. O critério de identificação de falha adotado é o pico do ângulo de fase observado ao longo do ensaio.



**Figura 4:** Formato do carregamento realizado para o ensaio LAS

### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Durante o ensaio de LAS, a variação do ângulo de fase foi observada a fim de identificar em qual ciclo de carregamento ocorreu a falha. Foi observado que, para as 30 amplitudes de deformação sugeridas no trabalho de Hintz *et al.* (2011), dificilmente a amostra atingia a ruptura. Portanto, um aumento na quantidade de amplitudes, assim como no número de ciclos de carregamento para cada amplitude, foi realizado. A Figura 5 apresenta os valores de módulo dinâmico e de ângulo de fase obtidos nos ensaios para (a) MAF A (TMN: 1,18mm) e (b) MAF B (TMN: 2,00mm).



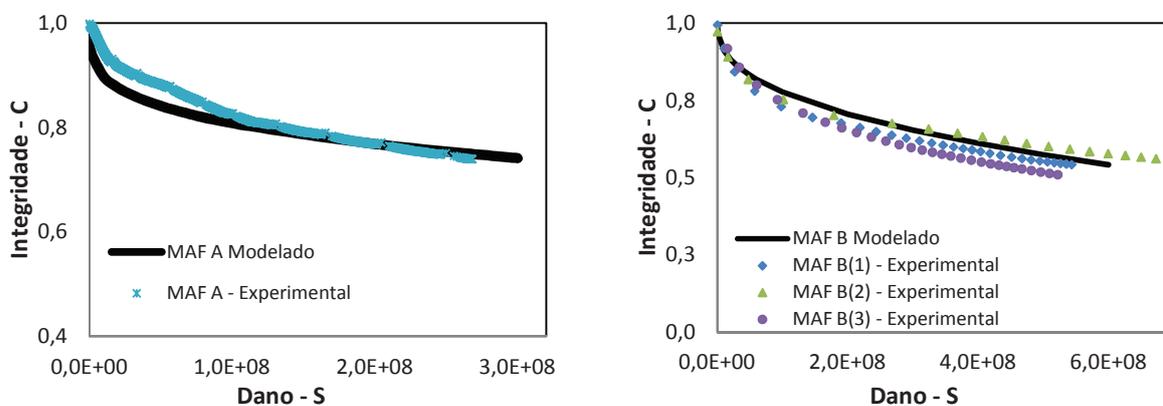
**Figura 5:** Comportamento do ângulo de fase e do módulo dinâmico durante o ensaio LAS

É possível observar pelos gráficos que em nenhum dos dois casos houve ruptura da amostra, considerando o critério mencionado anteriormente baseado no pico do valor do ângulo de fase. No caso da MAF B apenas 30 amplitudes de deformação foram utilizadas, enquanto que para a MAF A 50 amplitudes de deformação foram utilizadas. Independente da quantidade de amplitudes, a forma de carregamento do LAS não levou as amostras à ruptura. Essa dificuldade de romper as amostras de MAF está relacionada com a baixa capacidade de torque do equipamento utilizado (DSR) e com os valores de rigidez das amostras. Para a MAF B, a máxima amplitude de deformação que o equipamento pôde aplicar foi de 0,060%, enquanto que para a MAF A esse valor foi de 0,068%. O maior valor de deformação utilizado no esquema de carregamento proposto por Hintz *et al.* (2011) para ligantes asfálticos é de 30% de deformação, uma amplitude impossível de se atingir em amostras de MAF devido à sua rigidez elevada em comparação com a escala do ligante asfáltico.

A sugestão de mudança no protocolo do ensaio para que a amostra atinja a ruptura seria um incremento na quantidade de ciclos de carregamento aplicados para cada amplitude específica. As amplitudes responsáveis por causar dano de fato são apenas as amplitudes utilizadas no final do ensaio, que são aplicadas próximo do limite de capacidade de torque do equipamento. Entretanto, esse incremento nos ciclos de carregamento gera um aumento no tempo de ensaio. No trabalho desenvolvido por Freire (2015) foi observado que as amostras ensaiadas com o uso de ensaios de varredura de tempo à deformação controlada próximo do limite de capacidade de torque do equipamento levam, em média, 5h para romper. Então no esquema de carregamento do LAS muito mais tempo seria necessário para que as amostras rompam, uma vez que apenas a última amplitude de deformação utiliza o limite de capacidade de torque do equipamento. Por fim, o LAS foi proposto como um ensaio acelerado de fadiga, porém, devido à baixa capacidade de torque do reômetro, o ensaio torna-se mais demorado se comparado ao ensaio de varredura de tempo para a escala MAF.

Mesmo não tendo informações até a falha das amostras, ainda é possível construir curvas características de dano ( $C$  vs  $S$ ) para as duas MAFs em questão usando o modelo  $S$ -VECD. Para a MAF A (1,18mm) apenas um teste foi realizado, e a curva foi criada, enquanto que para a MAF B (2,00mm) três testes foram realizados permitindo observar a repetibilidade dos resultados. Para

cada curva obtida, a lei de potência sugerida no trabalho desenvolvido por Daniel e Kim (2002) foi utilizada para modelar os resultados obtidos ( $C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}}$ ). As Figuras 6(a) e (b) apresentam as curvas obtidas para as MAFs A e B, respectivamente.

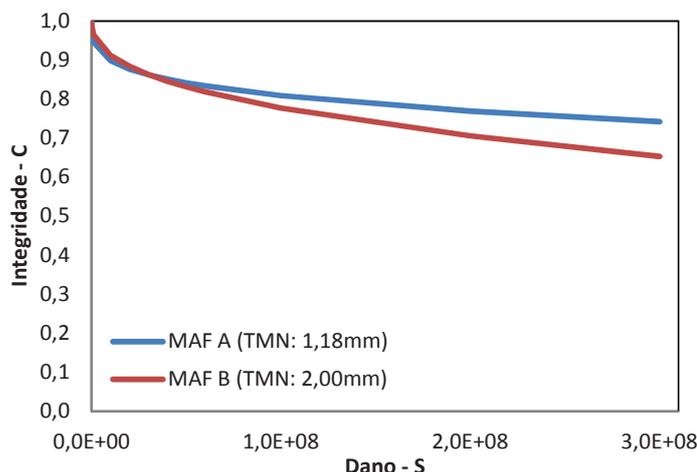


(a) MAF A (TMN: 1,18mm)

(b) MAF A (TMN: 2,00mm)

**Figura 6:** Curvas características de dano das misturas MAF

Mesmo sendo capaz de obter as curvas características de dano, não é possível prever o dano a partir do ensaio de LAS, uma vez que não existem informações sobre a falha das amostras. Entretanto, esse tipo de análise é útil para gerar dados para MAFs na zona viscoelástica não linear, já que durante o incremento de amplitude de deformações o comportamento da amostra passa por essa zona de comportamento. Por fim, as curvas características de dano obtidas para as MAFs com diferentes TMN podem ser comparadas, como está apresentado na Figura 7.



**Figura 7:** Comparação das curvas características de dano para MAFs com diferentes TMN

Através da Figura 7, pode-se perceber que o comportamento das duas curvas no começo do ensaio é similar. Porém, com a evolução do dano durante o ensaio, a MAF A (1,18mm) perde menos integridade quando comparada a MAF B (2,00mm). Isto ocorre pelo fato da MAF A

possuir uma estrutura interna mais uniforme, devido ao seu TMN e ao seu alto teor de ligante asfáltico (10,3%), sendo assim capaz de armazenar mais energia durante o carregamento, ao contrário da MAF B que dissipa mais energia na forma de trincas quando solicitada, perdendo assim sua integridade mais rapidamente.

#### 4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho utilizou um modelo fenomenológico para o entendimento do comportamento de MAFs com diferentes TMN durante a realização de ensaios cíclicos. Foi concluído que a forma de carregamento proposta pelo ensaio LAS não permite a obtenção de informações referentes ao mecanismo de dano para essa escala de análise. Ao modificar o protocolo de ensaio, o LAS perde a característica de ensaio acelerado de fadiga e torna-se mais demorado do que o ensaio convencional de varredura de tempo. Entretanto, o S-VECD pode ser utilizado para construção de curvas  $C$  vs  $S$  e para a análise do comportamento viscoelástico não-linear de misturas asfálticas. Por fim, esse protocolo de teste não permite a previsão do dano em MAFs, uma vez que este não oferece informações dos materiais na ruptura. Com relação aos diferentes TMN, não foi verificada sua influência nas curvas de dano no começo do ensaio, porém com a evolução do dano durante o ensaio, pode-se concluir que a diminuição do TMN da MAF diminui a perda de integridade desta ao longo de testes cíclicos. Isso ocorre devido a sua maior capacidade de armazenar energia quando solicitada.

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar ensaios de varredura de tempo em substituição ao LAS para caracterização do dano por fadiga na escala MAF. Pode também ser sugerida a preparação de amostras de mástiques (fíler e ligante asfáltico) ou de MAFs com geometria diferente com a intenção de diminuir a rigidez desses materiais ou aumentar o potencial de aplicação de amplitudes de deformação e permitir a obtenção de resultados na ruptura a partir do uso do LAS.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES e ao PETRAN pelo apoio financeiro dado a esta pesquisa. À Lubnor pelo fornecimento do CAP. À COPPE/UFRJ pelo auxílio com a extração das amostras.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANP (2005) Resolução n°19 da Agência Nacional de Petróleo - Regulamento Técnico n°03.
- ARAGÃO, F.T.S.; LEE, J., KIM, Y.R.; KARKI, P. (2010) Material - Specific Effects of Hydrated Lime on the Properties and Performance Behavior of Asphalt Mixtures and Asphaltic Pavement, *Journal of Construction and Building Materials*, Volume 24.
- ARAGÃO, F.T.S. (2011) Computational Microstructure Modeling of Asphalt Mixtures Subjected to Rate-Dependent Fracture. Tese de Doutorado, University of Nebraska – Lincoln. Lincoln, NE.
- ARAMBULA, E. (2007) Influence of Fundamental Material Properties and Air Voids Structure on Moisture Damage of Asphalt Mixes. Tese de Doutorado. Texas A&M University. College Station, TX.
- BABADOPULOS, L.F.A.L.; SOARES, J.B.; CASTELO BRANCO, V.T.F. (2014) Interpreting Fatigue Tests in Hot Mix Asphalt (HMA) Using Concepts From Viscoelasticity and Damage Mechanics. XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Curitiba, PA.
- CARO, S.; MASAD E.; AIREY G.; BHASIN A.; LITTLE D.N. (2008) Probabilistic Analysis of Fracture in Asphalt Mixes Caused by Moisture Damage. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2057, 28-36.

- CASTELO BRANCO, V.T.F. (2008) An 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.; PAMPLONA, T.F.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B.; MATEOS, A. (2010) Multiscale Approach for Characterization of Asphaltic Materials Designed in Brazil and Spain. 11th International Conference on Asphalt Pavements – ISAP, Japão.
- COUTINHO, R.P.; BABADOPULOS, L.F.A.L.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. (2011) Proposição de um Novo Método de Dosagem para Representação da Parte Fina de Misturas Asfálticas. XVI CILA, Rio de Janeiro, RJ.
- COUTINHO, R.P. (2012) Utilização da Parte Fina de Misturas Asfálticas para Avaliação do Dano por Fadiga. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- COUTINHO, R.P.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; BABADOPULOS, L.F.A.L.; SOARES, J.B. (2013) The Use of Linear Amplitude Sweep Tests to Characterize Fatigue Damage in Fine Aggregate Matrices. 1st Conference on Rheology and Processing of Construction Materials. Paris, FR.
- DANIEL, J.S., KIM, Y.R. (2002) Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic Continuum Damage Model. J. Assn. Asphalt Paving Technologists, vol. 71, 619-650.
- DAI, Q.; YOU, Z (2007) Prediction of Creep Stiffness of Asphalt Mixture and Micromechanics Finite-Element and Discrete Models. Journal of Engineering Mechanics, American Society of Civil Engineers, Volume 133, Number 2, 163–173
- DNER-ME 083/98. Agregados - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro.
- DNER-ME 053/94. Misturas Betuminosas: Percentagem de Betume. Rio de Janeiro.
- FREIRE, R. A.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; VASCONCELOS, K.L. (2014) Avaliação da Resistência ao Trincamento de Misturas Asfálticas Compostas por Agregados Miúdos com Diferentes Tamanhos Máximos Nominais. Transportes (Rio de Janeiro), v. 22, n. 3, p. 117-127.
- FREIRE, R. A (2015) Evaluation of the Coarse Aggregate Influence in the Fatigue Damage Using Fine Aggregate Matrices With Different Maximum Nominal Sizes. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.
- HINTZ, C., VELASQUEZ, R., BAHIA, H. U. (2011) Modification and Validation of the Linear Amplitude Sweep Test for Binder Fatigue Specification, In Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, TRB, N. 2207.
- HINTZ, C., BAHIA, H. U. (2013) Simplification of Linear Amplitude Sweep Test and Specification Parameter. In Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, N.2370, pp. 10-16.
- JOHNSON, C.M.; BAHIA, H.U. (2010) Evaluation of an Accelerated Procedure for Fatigue Characterization of Asphalt Binders. Road Materials and Pavement Design.
- JOHNSON, C.M. (2010) Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using an Accelerated Test Method. Tese de Doutorado, University of Wisconsin. Madison, WI.
- KARKI, P. (2010) Computational and Experimental Characterization of Bituminous Composites Based on Experimentally Determined Properties of Constituents. MSc. Thesis, University of Nebraska – Lincoln. Lincoln, NE
- KARKI, P. (2014) An Integrated Approach to Measure and Model Fatigue Damage and Healing in Asphalt Composites. Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin. Austin, TX.
- KIM, Y.R.; LITTLE D.N.; SONG I.I. (2003) Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1832, 1-8.
- KIM, Y.R.; SEO, Y.; KING, M.; MOMEN, M. (2004) Dynamic Modulus of Asphalt Concrete in Indirect Tension Mode Transportation Research Board, Washington, D.C.
- LUTIF, J.E.S. (2011) Computational Micromechanics Modeling of Damage-Dependent Bituminous Composites Based on Two-Way Coupled Multiscale Approach. PhD Dissertation, University of Nebraska – Lincoln. Lincoln, NE.
- MARTINS, A.T. (2014) Contribuição para a Validação dos Ensaios de Resistência ao Dano por Fadiga para Ligantes Asfálticos. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MASAD, E.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; LITTLE, D.N.; LYTTON, R. (2007) A Unified Method for the Analysis of Controlled-Strain and Controlled-Stress Fatigue Testing. International Journal of Pavement Engineering, vol. 9, 233-246.

- NASCIMENTO, L. A. H.; ROCHA, S. M. N.; NASCIMENTO, C. E. H.; KIM, Y. R.; CHACUR, M.; MARTINS, A. T. (2014) Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras. Anais do 21º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP. Rio de Janeiro.
- 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, USP. São Carlos, SP.
- PARK, S. W.; KIM, Y. R.; SCHAPERLY, R. A. (1996) Viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete. *Mechanics of Materials*, Vol.24, No.4, pp. 241-255.
- PAVALDI, S.; BHASIN, A.; LITTLE, D. N. (2012) Method to Quantify Healing in Asphalt Composites by Continuum Damage Approach. Transportation Research Board, pp. 86–96. Washington, DC.
- SAFAEI, F.; LEE, J.S.; NASCIMENTO, L.A.H.; HINTZ, C.; KIM, Y.R. (2014) Implications of Warm-Mix Asphalt on Long-Term Oxidative Aging and Fatigue Performance of Asphalt Binders and Mixtures. Transportation Research Board. Washington, DC.
- SCHAPERLY, R. A. (1990a) A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 38, pp. 215-253.
- SCHAPERLY, R. A. (1990b) Simplifications in the behavior of viscoelastic composites with growing damage. Symposium on Inelastic Deformation of Composite Materials. Troy, New York. Springer, New York-Wien, pp. 193-214.
- TONG, Y. (2013) Fatigue Resistance of Asphalt Mixtures Affected by Water Vapor Movement. PhD Dissertation, Texas A&M University. College Station, TX.
- TSAI, B. W., and MONISMITH, C. L. (2005). Influence of asphalt binder properties on the fatigue performance of asphalt concrete pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 74, 733– 790.
- UNDERWOOD, B. S.; BAEK, C.; KIM, Y. R. (2012) Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2296(-1), p. 36-45.
- VASCONCELOS, K.L.; BHASIN, A.; LITTLE, D.N. (2009) Influence of Reduced Production Temperatures on the Adhesive Properties of Aggregates and Laboratory Performance of Fine Aggregate – Asphalt Mixtures. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 11, Issue 1, p. 47-64, DOI: 10.1080/14680629.2010.9690259
- WILLIS, R.; TURNER, P.; PADULA, F. G.; TRAN, N. H.; JULIAN, G. (2013) Effects of Changing Virgin Binder Grade and Content on RAP Mixture Properties. In *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, TRB*. Washington, D.C.
- ZHOU, F.; MOGAWER, W.; LI, H.; ANDRIESCU, A.; COPELAND, A. (2013) Evaluation of Fatigue Tests for Characterizing Asphalt Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*. Vol. 25, Issue 5, p. 610-614.
- ZOLLINGER, C. (2005) Application of Surface Energy Measurements to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt and Aggregates. Dissertação de Mestrado, Texas A&M University. College Station, TX.

---

Reuber Arrais Freire (reuber\_freire@yahoo.com.br)<sup>1</sup>

Renato Peixoto Coutinho (rcout1@lsu.edu)<sup>2</sup>

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará  
Campus do Pici, Bloco 703, 60440-554, Fortaleza - CE – Brasil

<sup>2</sup>Craft & Hawkins Department Of Petroleum Engineering, Louisiana State University, 142 Old Forestry, Baton Rouge, LA 70803. USA.