

ANÁLISE DO DANO POR FADIGA EM AMOSTRAS DE MASTIQUE USANDO O *DYNAMIC MECHANICAL ANALYZER (DMA)*

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco⁽¹⁾

Dallas N Little⁽¹⁾

Jorge Barbosa Soares⁽²⁾

(1) TTI/TAMU

(2) LMP/DET/UFC

RESUMO

O processo de trincamento por fadiga em misturas asfálticas é um dos maiores causadores de insucessos em pavimentos. Alguns ensaios laboratoriais desenvolvidos para avaliar o comportamento de misturas asfálticas com relação a esse processo específico estão disponíveis na literatura. Os testes podem ser realizados sob várias formas de carregamento, temperaturas e frequências de aplicação de carga, geralmente apresentando diferentes resultados. Este estudo apresentou o método para análise do dano por fadiga em misturas de mastique com a utilização do *Dynamic Mechanical Analyzer (DMA)*. A técnica mostrou-se simples e promissora devido à economia de tempo e material e a possibilidade de utilização do conceito de energia dissipada no processo (o que aproxima os resultados das propriedades do material e não da condição do ensaio). O costumeiro ponto de término para os ensaios à deformação controlada (diminuição em 50,0% do módulo dinâmico inicial da amostra) é questionado neste estudo.

ABSTRACT

Fatigue cracking is one of the important distresses in asphalt mixtures. Several laboratory methods to analyze fatigue cracking behavior of asphalt are available in the literature. These tests are conducted under different loading conditions, temperatures and frequencies and result in different prediction of fatigue life. This study presents a method using the Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) to analyze damage due to fatigue cracking in mastic samples. This technique is simple and can be applied to quantify fatigue life with some advantages: it is not time-consuming and requires just a small amount of material. It also uses the dissipated energy concept which approximates results based on material properties and not on test conditions. The conventional failure criteria adopted in strain controlled tests (50.0% reduction in the initial sample modulus) is questioned in the present study.

1. INTRODUÇÃO

Um dos problemas mais comuns nos pavimentos flexíveis no Brasil e no mundo é o trincamento motivado pelo processo de fadiga das misturas asfálticas (Medina, 1997; Huang, 2004). Além disto, a vida de fadiga da camada de revestimento é um dos parâmetros usados nos métodos mais modernos de dimensionamento mecânicos de pavimentos no Brasil (Motta, 1991; Silva, 1995; Benevides, 2000). Avanços na fundamentação da avaliação da vida de fadiga de misturas asfálticas em laboratório contribuem positivamente para um dimensionamento mais compatível com o que se encontra em serviço.

Diante do exposto, o entendimento do processo de fadiga é essencial para a melhoria do quadro instalado nas rodovias brasileiras. Segundo Matthews *et al.* (1993), o ensaio de fadiga deve simular as condições encontradas em campo, gerar resultados que possam ser aplicados na modelagem do desempenho de pavimentos e ser simples. De acordo com esses mesmos autores, os ensaios de fadiga em misturas asfálticas podem ser divididos nas seguintes categorias: (a) flexão simples, (b) flexão com suporte, (c) carregamento axial direto, (d) carregamento diametral, (e) triaxial, (f) baseados em princípios da mecânica da fratura e (g) *wheel-track* testes.

O dilema da análise de resistência à fadiga em misturas asfálticas usando os modos a tensão ou a deformação controladas permanece sendo um entrave no desenvolvimento de um modelo

mais geral no que se refere a esse defeito específico. As análises convencionais têm encontrado resultados contraditórios no que diz respeito aos dois modos de ensaio (Medina, 1997; Huang, 2004; Loureiro, 2003). Nas instituições de pesquisa brasileiras, a vida de fadiga de misturas asfálticas é rotineiramente avaliada por meio de ensaios a tensão controlada em corpos de prova cilíndricos e carregados diametralmente. Internacionalmente, é comum a consideração da energia dissipada no processo, que tem como intuito a obtenção de um modelo de vida de fadiga que não dependa do modo de carregamento, aproximando-se mais da propriedade do material. Os métodos desenvolvidos na *Texas A&M University (TAMU)* para analisar o dano por fadiga em misturas de mastic (ligante asfáltico juntamente com agregado miúdo e filler, para este trabalho considerado as partículas menores do que 0,075 mm) usam o conceito de energia dissipada no processo (Dijk *et al.*, 1972; Kim *et al.*, 1997; Lee e Kim, 1998; Ghuzlan e Carpenter, 2000; Kim *et al.*, 2001; Zollinger, 2005).

Este estudo propõe a utilização do *Dynamic Mechanical Analyzer (DMA)* para a obtenção da vida de fadiga de amostras de mastic provenientes de Concretos Betuminosos Usinados a Quente (CBUQ) dosados e aplicados em trechos dentro dos Estados Unidos. O equipamento, antes apenas utilizado para avaliar polímeros, através de carregamento torcional nas amostras pode ser utilizado tanto para a obtenção de propriedades das misturas (módulo dinâmico e ângulo de fase) como da vida de fadiga (número de ciclos necessários para ruptura total da amostra). As análises utilizarão os conceitos da mecânica do contínuo e da fratura para avaliar os resultados encontrados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O entendimento do processo de fadiga nas misturas asfálticas não é simples devido à heterogeneidade do material, que é na realidade um compósito formado por partículas elásticas (agregados graúdos) e o mastic com propriedades viscoelásticas. O mastic leva a mistura a um comportamento dependente da taxa de carregamento, sendo sensível à temperatura, além ainda de sofrer um processo de endurecimento devido ao envelhecimento do ligante (SHRP, 1994).

No ensaio a tensão controlada, a tensão na amostra é controlada enquanto a deformação é observada. No outro modo, a deformação é controlada até o final do ensaio, sendo observada a tensão necessária para manter a deformação desejada. Alguns autores afirmam que o ensaio a tensão controlada é mais indicado para revestimentos espessos devido à perda de rigidez com a aplicação da carga. Por outro lado, o modelo de carregamento a deformação controlada é indicado como mais representativo para revestimentos esbeltos. Devido à maior contribuição das subcamadas com relação à absorção das tensões solicitantes nesse segundo tipo, a deformação é controlada pelas camadas subjacentes e assim a diminuição da rigidez na camada de revestimento não é levada em consideração. O problema reside no fato de que quando se realiza o ensaio a deformação ou a tensão controlada, os resultados são diferentes. Para uma mesma mistura asfáltica, frequentemente é encontrada uma maior vida de fadiga quando se usa o modelo a deformação controlada, comparativamente ao modelo a tensão controlada (Matthews *et al.*, 1993; Medina, 1997; Huang, 2004). Busca-se no momento, para um melhor entendimento da vida de fadiga de misturas asfálticas, o desenvolvimento de um método independente do tipo de carregamento.

No Brasil, tradicionalmente, utiliza-se o ensaio a tensão controlada, sob compressão diametral, com uma frequência de 1Hz e equipamento pneumático. Esse método é mais rápido

e possui um critério de término bem definido, enquanto que no ensaio a deformação controlada o critério de término é difícil de ser definido, não havendo um consenso. Alguns autores consideram a diminuição da rigidez inicial da mistura em 50% como término, enquanto outros utilizam a mudança na energia dissipada acumulada por ciclo de carga ou o máximo valor do ângulo de fase com relação ao tempo (Pronk e Hopman, 1990; Pinto, 1991; Tayeballi *et al.*, 1993; Medina, 1997; Reese, 1997; Balbo, 2000; Loureiro, 2003). Monismith (1958) relatou as seguintes desvantagens do ensaio a tensão controlada: (a) alta incidência de diferentes tipos de fratura, (b) concentrações de tensões nos frisos de cargas, (c) limitações nas condições de carregamento, (d) inconstante estado biaxial de tensões (e) impossibilidade de inverter os campos de tensão e (f) confusa influência de deformações permanentes na resistência dos corpos de prova durante o ensaio.

Durante o processo de fadiga, ocorre dano no material (mudança em sua estrutura causando diminuição na rigidez) e dissipação de energia. A resistência à fadiga depende, portanto, do montante de energia dissipada nos ciclos de tensão-deformação onde, para a mesma frequência, a onda de deformação fica defasada de um determinado valor (ângulo de fase) em relação a de tensão, formando o que se conhece por *loop* de histerese (Tayeballi *et al.*, 1993; Shames, 1997). A histerese é atribuída a três grandes fatores: (a) desenvolvimento do dano no processo de fadiga, (b) natureza viscoelástica do material e (c) *healing* químico (processo de fechamento das trincas). Dijk *et al.* (1972) foram os primeiros a definir o conceito de energia dissipada no processo para misturas asfálticas usando a Equação 1.

$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \delta \quad (1)$$

Onde, W_i é a energia dissipada no ciclo i ; σ_i é a tensão aplicada no ciclo i ; ε é a deformação aplicada no ciclo i ; e δ é o ângulo de fase. Para o processo inteiro basta somar a quantidade de energia dissipada em todos os ciclos (W_{total}). Dijk (1975) definiu a vida de fadiga através da Equação 2.

$$W_{total} = A \times N^z \quad (2)$$

Onde, A e z são coeficientes experimentais e N é a vida de fadiga.

Já se sabe que a relação entre o montante de energia dissipada no processo e o número de ciclos que leva a amostra a ruptura é dependente não apenas das características das misturas asfálticas, mas também do tipo de carregamento utilizado e da temperatura de ensaio. No ensaio a deformação controlada, a energia é completamente dissipada pela amostra durante o processo de dano do material, logo a energia dissipada em cada ciclo tende a diminuir. A tensão controlada, o inverso ocorre, isto é, a energia dissipada por ciclo (suprida pelas forças externas e dissipada pela amostra) tende a aumentar, devido ao aumento do trincamento no material. Neste caso, acredita-se que o deslocamento do último *loop* de histerese em relação ao primeiro, bem como o aumento da energia dissipada no processo, podem ser relacionados com a diminuição do *loop* de histerese, e, conseqüentemente, da energia dissipada no processo quando o ensaio é realizado a deformação controlada (Taybelli *et al.*, 1993; Ghuzlan e Carpenter, 2000).

O conceito de energia dissipada na observação do processo de fadiga já vem sendo utilizado há alguns anos em universidades norte-americanas e européias. A vantagem desta forma em relação às anteriormente descritas é o fato de se poder obter a vida de fadiga de misturas com a utilização de ensaios simples e sobre várias condições, levando-se em consideração a evolução do dano no material e utilizando-se diferentes tipos de carregamento e temperaturas (Tayeballi *et al.*, 1993).

A avaliação do dano no processo de fadiga pode ser realizada com a utilização do *Dynamic Mechanical Analyzer (DMA)*, que pode ser visto na Figura 1 juntamente com as amostras utilizadas para a realização do ensaio. O equipamento consiste basicamente de quatro partes: (a) estação de teste, (b) sistema controlador, (c) computador para aquisição dos dados e (d) controlador de temperatura. Este equipamento vem sendo utilizado para caracterização de mastiques desde a década de 80, mas originalmente foi empregado para avaliação das propriedades viscoelásticas de outros materiais, como polímeros.

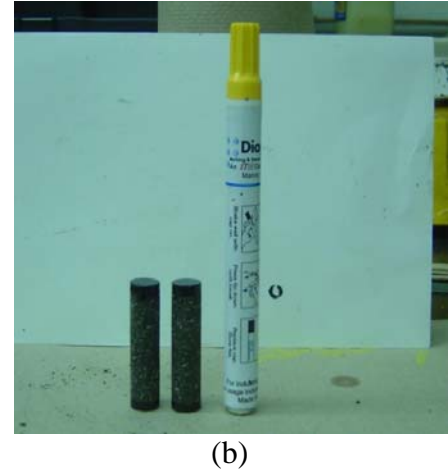
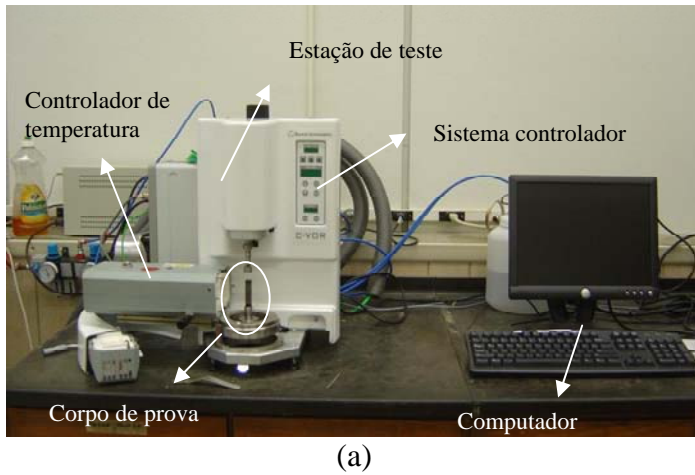


Figura 1: (a) DMA (Bohlin Instrumentos, C-VOR 200) e (b) Corpos de prova utilizados

O equipamento permite a utilização de amostras em diferentes formatos (retangulares ou cilíndricas, por exemplo) e tipos de carregamento, inclusive com a utilização de períodos de descanso. Para o presente estudo, as amostras são submetidas a um carregamento por torção com um torque (T) e um ângulo de giro constante (φ). A representação harmônica analítica do deslocamento com relação ao tempo pode ser expressa pela Equação 3 (Kim, 2003).

$$\varphi(t) = \varphi_0 \sin(\omega t) H(t) \quad (3)$$

Onde, φ_0 é a amplitude de giro; ω é a velocidade angular e $H(t)$ é a função de varredura. A história de deformação cisalhante oscilatória para um determinado tempo (t) é dada por:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t) H(t) \quad (4)$$

$$\gamma_0 = \varphi r / L \quad (5)$$

Onde, γ_0 é a amplitude da deformação cisalhante, r é o raio da amostra e L o seu comprimento. Se as amostras apresentarem comportamento viscoelástico linear, a tensão

cisalhante, correspondente à deformação cisalhante oscilatória descrita acima, é dada pela Equação 6.

$$\tau(t) = \gamma_0 |G^*(w)| \sin(wt + \phi) \quad (6)$$

Onde, $|G^*(w)|$ é o módulo dinâmico viscoelástico linear e ϕ é o ângulo de fase viscoelástico linear.

Usando a teoria proposta por Schapery (1984), o dano que ocorre no material pode ser representado pelas chamadas pseudo-variáveis. Logo, o uso da pseudo-deformação elimina a dependência viscoelástica do tempo, podendo ser medido assim o dano adicional do material. A pseudo-deformação é dada pela Equação 7.

$$\gamma_R = \frac{I}{E_R} [\gamma_0 |G^*(w)| \sin(wt + \phi)] \quad (7)$$

Onde, E_R é o módulo de referência (relação entre os picos de tensão e deformação na região linear viscoelástica sem dano).

Kim (2003) introduziu o conceito de pseudo-rigidez (C) com o intuito de analisar o dano no material. A pseudo-rigidez é dada por:

$$C = \frac{\tau_m}{\gamma_m^R} \quad (8)$$

Onde, γ_m^R é a pseudo-deformação máxima e τ_m é a tensão correspondente a este valor de pseudo-deformação.

As análises utilizando o *DMA* podem ser feitas através de duas teorias distintas: (i) a mecânica do contínuo e (ii) a micromecânica dos materiais (que utiliza os conceitos da mecânica da fratura). Com relação à primeira análise, o dano no material é quantificado com a utilização de três parâmetros: (a) parâmetro de dano contínuo S (Equação 9), (b) energia de pseudo-deformação dissipada (área do *loop* formado através do gráfico de tensão versus pseudo-deformação) e (c) energia de pseudo-deformação dissipada acumulada (Kim *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2003; Zollinger, 2005). Na análise micromecânica pode-se utilizar a abordagem descrita em Souza *et al.* (2004) ou as equações derivadas por Lytton em 2004. Essas equações são baseadas na premissa de que a energia no material danificado (composto por uma fase sem dano, módulo igual a G e com trincas) é igual a energia de um outro material equivalente com módulo G' (representa uma seção transformada, equivalente mas sem trincas).

$$S \cong \sum_{i=1}^N \left[\frac{I}{2} (\gamma_{N,i}^R) (C_{i-1} - C_i) \right]^{\alpha/(1+\alpha)} (t_i - t_{i-1})^{1/(1+\alpha)} \quad (9)$$

Onde, C_i é a pseudo-rigidez; t_i é o tempo correspondente a pseudo-rigidez C_i e α é uma constante do material.

As equações derivadas por Lytton (2004) estão dispostas na Tabela 1 para os ensaios a tensão e a deformação controladas para fratura adesiva (aquela que ocorre entre a interface agregado-ligante) e coesiva (aquela que ocorre no próprio filme de ligante).

Tabela 1: Relações entre G' e G (Lytton, 2004)

Tipo de Ensaio	Tipo de Fratura	
	Coesiva	Adesiva
Tensão Controlada	$\frac{G'}{G} = \frac{I}{I + 2\pi^2 \frac{m}{A} \frac{\bar{c}^3}{t} \left[I - \frac{G_f(\Delta G^c)}{\pi \sigma^2 \bar{c}} \right]}$	$\frac{G'}{G} = \frac{I}{I + \pi^2 \frac{m}{A} \frac{\bar{c}^3}{t} \left[\left(I + \frac{G_f}{G_s} \right) - \frac{2G_f(\Delta G^a)}{\pi \sigma^2 \bar{c}} \right]}$
Deformação Controlada	$\frac{G'}{G} = I - 2\pi^2 \frac{m}{A} \frac{\bar{c}^3}{t} \left[I - \frac{G_f(\Delta G^c)}{\pi \sigma^2 \bar{c}} \right]$	$\frac{G'}{G} = I - \pi^2 \frac{m}{A} \frac{\bar{c}^3}{t} \left[\left(I + \frac{G_f}{G_s} \right) - \frac{2G_f(\Delta G^a)}{\pi \sigma^2 \bar{c}} \right]$

Onde, m/A é a densidade de trincamento (número de trincas dividido pelo comprimento médio das mesmas), \bar{c} é o raio médio das trincas (metade do comprimento), ΔG^c e ΔG^a são as energia de superfície total para as fraturas coesiva e adesiva, respectivamente. Os índices subscritos f e s indicam que a energia é associada com o fluido (ligante) e com os sólidos (agregados), respectivamente. Os valores entre a razão G'/G calculada e medida podem ser comparadas.

Kim e Little (2003) apontam o modo de carregamento por torsão como a melhor forma de simular o dano para o caso do movimento provocado pelo tráfego. Há ainda a vantagem de se utilizar um equipamento no qual a amostra é de tamanho reduzido (neste estudo serão utilizados cilindros de 12mm de diâmetro e 50mm de altura) (Figura 2b), o que permite a economia de material e a conseqüente geração de um grande número de dados, facilitando a análise estatística dos resultados obtidos. A economia de tempo também é outro fator que deve ser levado em consideração. Os ensaios, a depender da rigidez da amostra e do modo de ensaio utilizado, duram em torno de 30 minutos a 2 horas cada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo são investigadas duas misturas asfálticas com diferentes agregados e ligantes usados no estado do Texas, Estados Unidos. As amostras utilizadas para realização dos testes no *DMA* são produzidas somente com a parte fina dos agregados (menor do que 1,18 mm - # n°16), fíler (neste estudo considerado apenas a parte menor do que 0,075 mm - # n°200) e ligante a partir de misturas completas (agregados graúdos, miúdos, fíler e ligante). As misturas completas são reduzidas considerando-se duas relações: volume de fíler igual a 10,0% do volume de ligante e a relação entre a massa da mistura fíler e ligante com relação a massa de agregado miúdo igual a 8,0% (Kim e Little, 2003; Zollinger, 2005). As misturas utilizadas estão descritas na Tabela 2. Os ligantes utilizados são: (a) PG 76-22 e (b) PG 64-22, para as misturas 1 e 2, respectivamente.

Kim *et al.* (2002) demonstraram que a taxa e o montante acumulado do dano que ocorre no material depende da natureza do mastique analisado. Logo, o procedimento de dosagem dos

mastiques é de fundamental importância. Alguns estudos brasileiros já haviam ressaltado a importância do mastique na dosagem de misturas asfálticas (Santana, 1995; Motta e Leite, 2000; Cavalcante *et al.*, 2001).

Tabela 2: Misturas utilizadas neste estudo

Peneira (tamanho, mm)	% Passando Acumulado				
	Mistura 1			Mistura 2	
	Pó de Pedra	Agregado Granítico (Companhia Donnafill)	Cal Hidratada	Areia Calcárea	Areia Natural
16 (1,18)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
30 (0,6)	61,1	94,8	100,0	60,1	64,0
50 (0,3)	49,7	57,3	100,0	25,4	23,3
100 (0,15)	26,9	22,4	100,0	6,3	2,9
200 (0,075)	1,7	1,7	100,0	1,8	1,8

Os materiais utilizados foram caracterizados segundo a metodologia Superpave para ligantes e agregados (Motta *et al.*, 1996; Roberts *et al.*, 1996). Além da caracterização Superpave dos agregados, também serão avaliadas as características mineralógicas e de forma, angularidade e textura utilizando o *Aggregate Imaging System (AIMS)* (Figura 2). A angularidade e a textura governam as propriedades de fricção e dilatação dos agregados. A textura ainda desempenha papel fundamental na adesividade entre o ligante e os agregados, e a forma destes materiais influencia o caráter anisotrópico das misturas asfálticas (Masad *et al.*, 2004a).

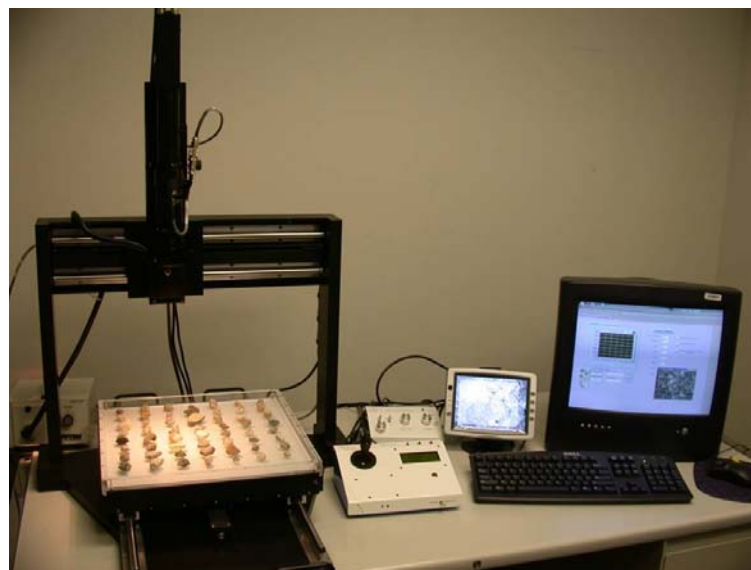


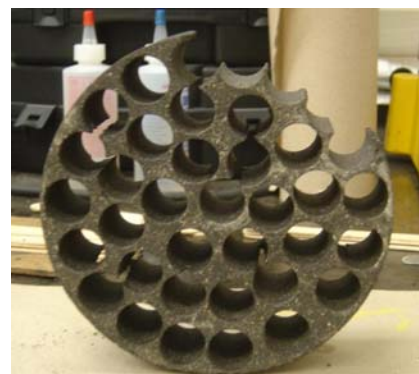
Figura 2: *Aggregate Imaging System (AIMS)*

As amostras podem ser produzidas segundo duas metodologias: (i) Kim e Little (2003) e (ii) Zollinger (2005). Na primeira metodologia, o ligante juntamente com o filer é misturado com os outros agregados na temperatura de mistura de cada ligante específico. Aproximadamente 11,5 gramas são aquecidas, juntamente com o molde de compactação, por aproximadamente 30 minutos. O material é então colocado no molde e compactado com a utilização de um gabarito. O corpo de prova (50 mm × 12 mm) é desenformado após 30 minutos, para garantir que o conjunto (molde e corpo de prova) atingiu a temperatura ambiente. Geralmente, obtém-se um volume de vazios de aproximadamente 17,0% nestas amostras. A vantagem de se

utilizar esse método é a possibilidade de moldar um grande número de amostras (10) com pouco consumo de material (aproximadamente 300 gramas de agregado), conforme ilustrado na Figura 3a. O segundo método consiste em moldar corpos de prova segundo a metodologia Superpave e depois extrair desses corpos de prova outros corpos de prova menores com as dimensões requeridas para a realização do teste utilizando o *DMA*. Com este método consegue-se extrair aproximadamente 32 amostras para o *DMA* de um corpo de prova com aproximadamente 150 mm de diâmetro e 85 mm de altura. Com a utilização deste último método consegue-se um melhor controle dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas, porém uma maior quantidade de material é requerida (aproximadamente 4.000 gramas de agregados para a produção de 32 amostras). Para este estudo a segunda metodologia foi adotada por acreditar-se que esta fornece um melhor controle dos parâmetros volumétricos para as misturas (Figura 3b).



(a) Molde para compactação do corpo de prova e gabarito (1º método)



(b) Corpo de prova proveniente do compactador giratório Superpave com amostras extraídas para realização do teste de fadiga utilizando o *DMA* (2º método)

Figura 3: Metodologias para obtenção das amostras que serão utilizadas no *DMA*

4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Os ensaios são realizados em um reômetro CVOR 200 produzido pela Bohlin Instrumentos. O reômetro foi adaptado com seguradores fabricados pelo *Texas Transportation Institute* (TTI) com a intenção de melhor alinhar a amostra e evitar distorções nos resultados encontrados (Zollinger, 2005). As amostras são coladas nos seguradores com a utilização de uma cola de secagem rápida (Devcon). A cola usada exige um tempo de espera de no mínimo 20 minutos para completa colagem.

Os ensaios de fadiga podem ser realizados nas amostras a deformação ou a tensão controlada. Para este estudo os ensaios foram realizados a deformação controlada, com carregamento torcional senoidal. A tensão e a deformação durante o ensaio são registradas, sendo a diferença temporal entre as magnitudes destes dois parâmetros o chamado ângulo de fase, conforme visto na Figura 4. Os corpos de prova são ensaiados com amplitude equivalente a 0,0065% de deformação, comportamento viscoelástico linear, frequência de 10Hz, temperatura de 25°C, com vistas a obtenção do módulo complexo cisalhante linear (G^*) e do ângulo de fase (δ). Estes dois parâmetros serão utilizados para a obtenção da pseudo-deformação na porção do material atingida pelo dano por fadiga. Posteriormente, realiza-se o ensaio com uma maior amplitude de deformação (equivalente a 0,2% de deformação) para

representar o dano por fadiga e observa-se o número de ciclos de carregamento que a amostra suportou até a ruptura.

As duas fases do ensaio podem ser visualizadas na Figura 5. Na parte (a) da Figura 5 é possível perceber que o módulo complexo (G^*) mantém-se aproximadamente constante durante o ensaio. Já na parte (b), o G^* diminui com o tempo gradativamente até que acontece uma diminuição rápida no valor, sendo este ponto considerado o término do ensaio (geralmente consegue-se visualizar a formação da trinca no primeiro terço da amostra).

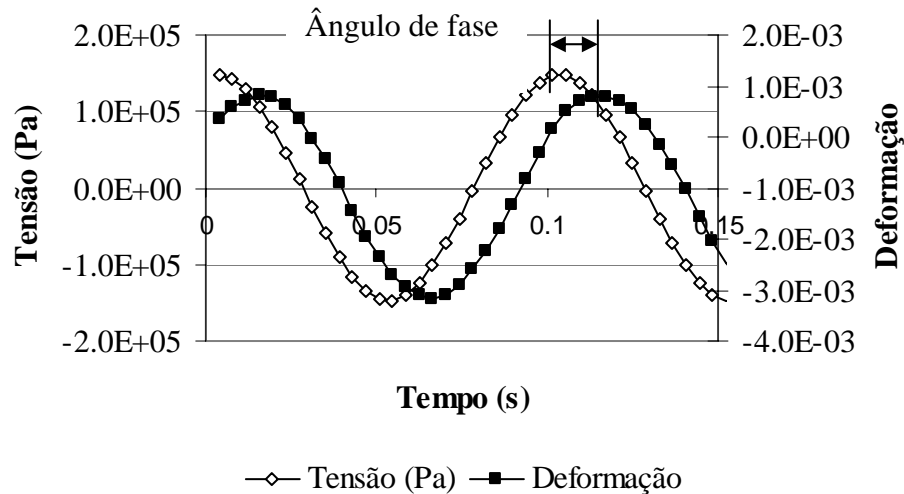


Figura 4: Acompanhamento da tensão e da deformação durante o ensaio no *DMA*

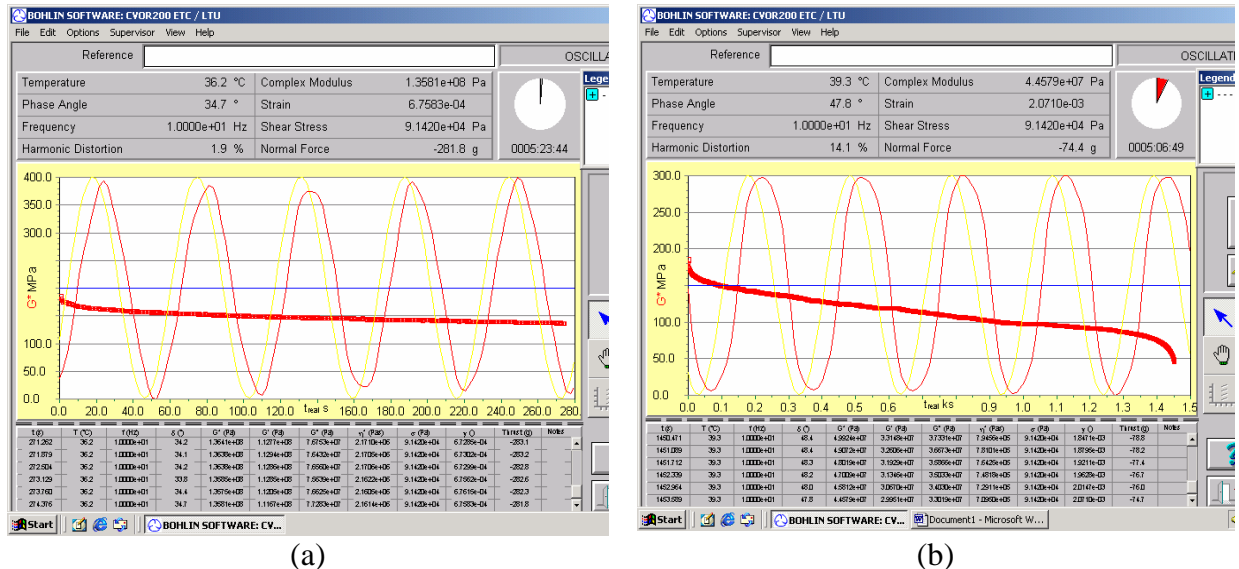


Figura 5: Duas fases do ensaio no *DMA*: (a) baixa amplitude de deformação e (b) alta amplitude de deformação

Para cada ciclo de carregamento, o equipamento fornece o torque (T) e o deslocamento (δ). Com estes dados, utilizando-se a transformada de Fourier, calcula-se: (a) módulo dinâmico (Pa), (b) módulo elástico (Pa), (c) módulo viscoso (Pa), (d) ângulo de fase ($^\circ$), (e) tensão cisalhante (Pa), (f) deformação e (g) carga que está causando uma força normal à amostra

(gramas). Para este estudo, baseado nas experiências de Kim e Little (2003) e Zollinger (2005) os dados foram coletados a cada 5 ciclos e utilizando 128 pontos por ciclo para a utilização da transformada de Fourier. A tensão e a deformação são obtidas utilizando-se as Equações 10 e 11, onde C_1 e C_2 são fatores fornecidos pelo fabricante do reômetro relacionados com a inércia dos fixadores utilizados para a montagem do experimento. Estes fatores são respectivamente iguais a 983.147 e 0,1.

$$\sigma = T \times C_1 \quad (10)$$

$$\varepsilon = \delta \times C_2 \quad (11)$$

Um mínimo de cinco amostras por mistura é ensaiado. Para as análises, os dados fornecidos pelo equipamento (torque e deslocamento) são utilizados para calcular: tensão, deformação, pseudo-deformação, pseudo-energia dissipada e pseudo-rigidez.

A título ilustrativo o resultado de uma amostra ensaiada a deformação controlada é analisada a seguir. Os resultados encontrados para a mistura 2 para o módulo dinâmico (região viscoelástica linear) e para o ângulo de fase, respectivamente, foram: 122 MPa e 30.3°. Estes resultados são próximos daqueles encontrados por Zollinger (2005) com a utilização das mesmas misturas asfálticas. Um exemplo de resultado típico utilizado para a obtenção da vida de fadiga de misturas asfálticas com utilização do *DMA* é mostrado na Figura 6 abaixo. N é o número de ciclos necessário para a ruptura total da amostra, G^* e G_0 são os módulos dinâmicos com o material danificado e inicial (região viscoelástica linear), respectivamente. Esta razão é uma boa indicação do volume de material que encontra-se intacto e capaz de dissipar energia durante o carregamento. Observando a Figura 6, dois parâmetros podem ser analisados: a vida de fadiga da mistura (para este caso igual a 11.000 ciclos de aplicação de carga) e a redução do módulo dinâmico para o ponto adotado como a vida de fadiga da mistura (neste caso o módulo dinâmico reduziu para aproximadamente 41,0% do valor inicial). Com este resultado, pode-se perceber que o valor de 50,0% de redução na rigidez da mistura comumente adotado para término dos ensaios de fadiga pode não ser representativo para todas as misturas.

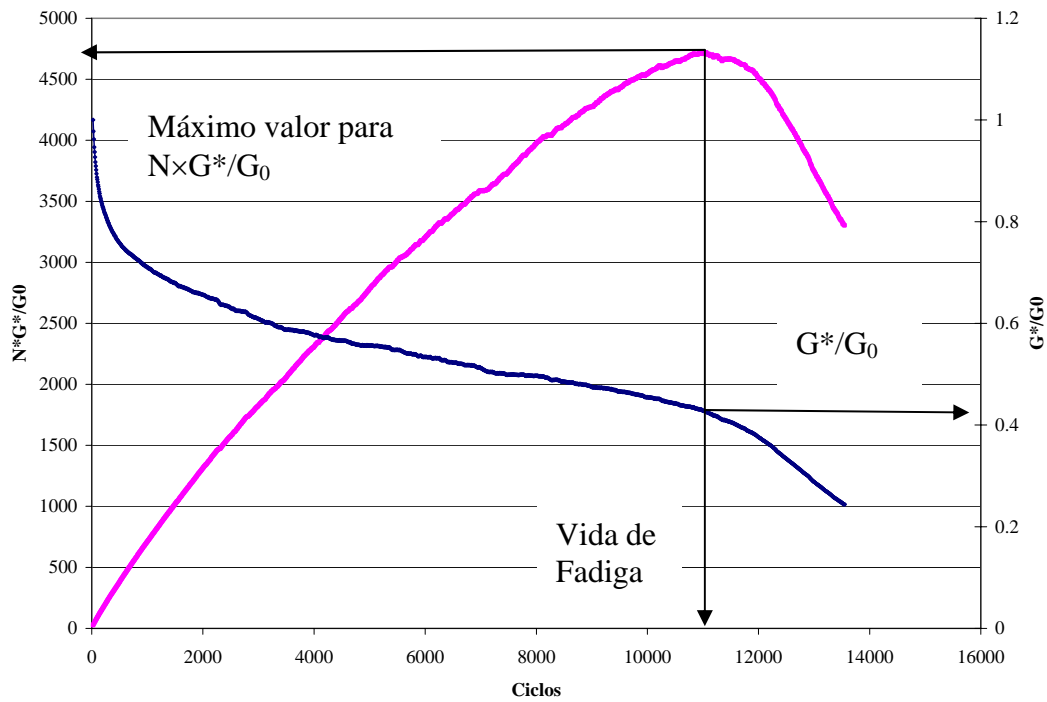


Figura 6: Resultado típico para as análises com o *DMA*

A energia de pseudo-deformação dissipada (*DPSE*) durante o ensaio também pode ser analisada somente com o acompanhamento da área do *loop* de histerese. Para este ensaio, a deformação controlada, como era de se esperar, a área do *loop* com o decorrer do ensaio tende a diminuir, uma vez que para manter a mesma deformação, a tensão necessária é cada vez menor (Figura 7). A energia de pseudo-deformação dissipada por unidade de volume de material intacto e capaz de dissipar energia (W_R) é outro parâmetro utilizado para avaliar o potencial das misturas asfálticas estudadas. W_R pode ser calculado utilizando-se a Equação 12. A inclinação do gráfico W_R versus N (escala logarítmica) (Figura 8) representa a razão do dano acumulado na amostra em questão. Quanto menor a inclinação deste gráfico, mais devagar a amostra irá atingir a vida de fadiga e parar de acumular dano. Esta inclinação pode ser utilizada para ranquear misturas asfálticas.

$$W_R = \frac{DPSE}{\frac{G^*}{G_0}} \quad (12)$$

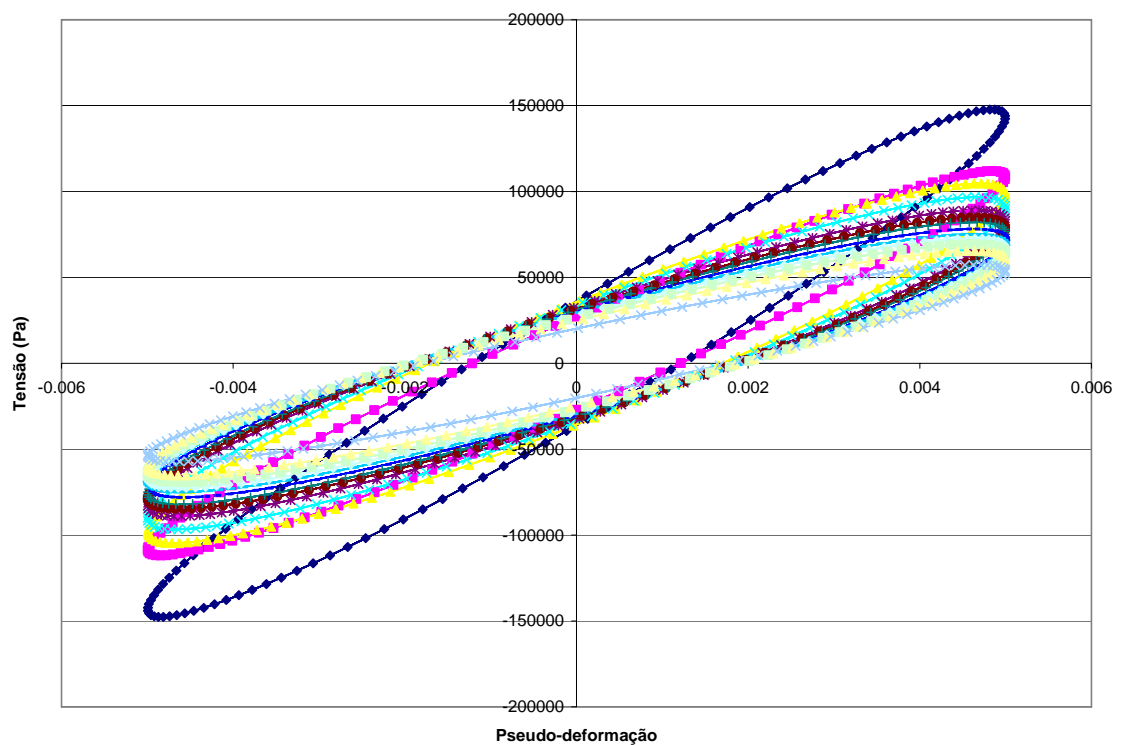


Figura 7: Loop de histerese no ensaio a deformação controlada

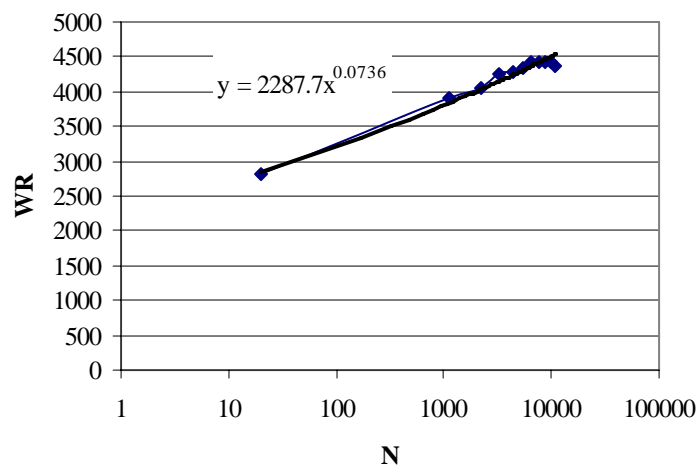


Figura 8: Gráfico típico da energia de pseudo-deformação dissipada versus o número de ciclos

Os resultados encontrados serão correlacionados (entre si e com os resultados obtidos por Zollinger em 2005) com a intenção de melhor avaliar a vida de fadiga dos materiais utilizados. Este estudo se encaixa em um projeto em desenvolvimento na TAMU há algum tempo. Vários estudantes de pós-graduação trabalham no mesmo, sob diferentes perspectivas. Desta forma, os resultados obtidos deverão ser correlacionados com outros estudos: obtenção da vida de fadiga (Kim *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2004), obtenção da energia de superfície para as misturas com avaliação inclusive do efeito deletério da água nas mesmas (Hefer, 2004; Zollinger, 2005), com a análise da forma (angularidade, textura e tamanho) dos agregados

aqui utilizados (Masad *et al.*, 2004(1); Masad *et al.*, 2004(2); Zollinger, 2005), análise da distribuição dos agregados e volume de vazios nas misturas (Castelblanco *et al.*, 2004);

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho tem como intuito apresentar o método com a utilização do *DMA* com a ilustração de um exemplo real. Apesar do estudo encontrar-se em andamento, percebe-se que a análise da vida de fadiga com utilização do *DMA* é bastante promissora sob os seguintes pontos de vista:

- O costumeiro ponto de término escolhido para os ensaios a deformação controlada (diminuição de 50% da rigidez do material) pode não ser representativo para todos os materiais;
- O ensaio é simples e permite economia de material e tempo, inclusive com possibilidades de análises estatísticas com grande número de amostras;
- As análises podem ser feitas utilizando-se da mecânica do contínuo ou da fratura com intuito de se aproximar da propriedade do material;
- A utilização deste método com realização de ensaios a tensão e a deformação controladas (com utilização do conceito de energia dissipada no processo) poderá ajudar na unificação das respostas destes dois tipos de ensaios.

Agradecimentos

O primeiro e o terceiro autores agradecem ao TTI e ao CNPq pelas respectivas bolsas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balbo, J.T. (2000) Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga, 32ª RAPv, Brasília, Brasil.
- Benevides, S.A.S. (2000) *Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos – Empírico do DNER e Resiliência da COPPE/UFRJ em Rodovias do Ceará*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Castelblanco, A.E.; Masad, E. e Birgisson, B. (2004) HMA Moisture Damage as a Function of Air Voids Size Distribution, Pore Pressure and Bond Energy, Journal of Testing and Evaluation, ASTM.
- Cavalcante, V. T. F. e Soares, J. B. (2001) O efeito do teor e do tipo de filer nas propriedades mecânicas das misturas betuminosas, 33ª RAPv, Florianópolis, Brasil.
- Dijk, W.V., Moreaud, H., Quedeville, A. e Uge, P. (1972) The Fatigue of Bitumen and Bituminous Mixes, Proceedings of the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, v. 1, p. 354.
- Dijk, W.V. (1975) Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes, Proceedings of Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, v. 44. p. 38-74.
- Ghuzlan, K.A. e Carpenter, S. H. (2000) Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue Testing, Transportation Research Board, Washington DC, Estados Unidos.
- Hefer, A.W. (2004) Adhesion in Bitumen-Aggregate Systems and Quantification of the Effects of Water on the Adhesive Bond. Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, Estados Unidos.
- Huang, Y.H. (2004) *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 2 ed.
- Kim, Y.R.; Lee, H. e Little, D.N. (1997) Fatigue Life Characterization of Asphalt Concret Using Viscoelasticity and Continuum Damage Theory, Proceedings the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 66.
- Kim, Y.R., Lee H. e Little, D.N. (2001) Microdamage Healing in Asphalt Concrete, A Viscoelastic Continuum Damage Fatigue Model of Asphalt Concrete with Microdamage Healing, Federal Highway Administration, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, v. 4, FHWA-RD-98-144.
- Kim, Y.R.; Little, D.N. e Lytton, R.L. (2002) Fatigue and Healing Characterization pf Asphalt Mixtures, Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers.
- Kim, Y.R. (2003) Mechanistic Fatigue Characterization and Damage Modeling of Asphalt Mixtures, Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, Estados Unidos.

- Kim, Y.R. e Little, D.N. (2003) Development of Specification-Type Tests to Assess Damage and Healing Properties of Bitumens and Mastics, Federal Highway Administration, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, FHWA/473630.
- Kim, Y.R., Little, D.N. e Song, I. (2003) Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics: Mechanics Evaluation, Transportation Research Record 1832, Transportation Research Board, p. 1-8, Washington D.C., Estados Unidos.
- Kim, Y.R., Little, D.N. e Lytton R.L. (2004) Effect of Moisture Damage on Material Properties and Fatigue Resistance of Asphalt Mixtures, Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington D.C., Estados Unidos.
- Lee, H. e Kim, R.Y. (1998) Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete Under Cyclic Loading, Journal of Engineering Mechanics.
- Lytton, R.L. (2004) *Adhesive Fracture in Asphalt Concrete Mixtures*, Capítulo do livro editado por J. Youtcheff, In Press.
- Loureiro, T.G. (2003) *Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas*, Tese de M.Sc., PETRAN/UFC, Fortaleza, CE, Brasil.
- Masad, E.; Little, D.N. e Sukhwani, R. (2004)(1) Sensitivity of HMA Performance to Aggregate Shape Measured Using Conventional and Image Analysis Procedures, Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers.
- Masad, E.; Tashman, L.; Little, D.N. e Zbib, H. (2004)(2) Viscoelastic Modeling of Asphalt Mixes with the Effects of Anisotropy, Damage and Aggregate Characteristics, Submitted for publication in the Journal of Mechanics of Materials.
- Matthews J.M.; Monismith C.L. e Craus J. (1993) Investigation of laboratory testing procedures for asphalt aggregate mixtures. Journal of Transportation Engineering.
- Medina, J. (1997) *Mecânica dos Pavimentos*, 1ª edição, COPPE/UFRJ.
- Monismith C.L. (1958) Flexibility Characteristics of Asphaltic Paving Mixtures, Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists, v. 27.
- Motta, L.M.G. (1991) *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis, Critério de Confiabilidade e Ensaio de Carga Repetida*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Motta, L. M. G.; Tonial, I.; Leite, L. M. F e Constantino, R. S. (1996) *Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas*. Tradução Comentada, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Motta, L. M. G. e Leite, L. M. F. (2000) Efeito do filler nas características mecânicas das misturas asfálticas, XI PANAM, Brasil, p. 09-19.
- Pinto, S. (1991) *Estudo do Comportamento a Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Pronk, A.C. e Hpmann, P.C. (1990) Energy dissipation: the leading factor of fatigue. In Highway Research: sharing the benefits: Proceeding of a Conference of the United States Strategic Highway, Research Program, London, p. 255-267.
- Reese, R. (1997) Properties of Aged Asphalt Binder Related to Asphalt Concrete Life, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 66, p. 604-632.
- Roberts, F.L.; Kandhal, P.S.; Brown, R.E.; Lee D. e Kennedy, T.W. (1996) *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA. Maryland, Estados Unidos.
- Souza, F. V.; Soares, J. B.; Allen, D. H. e Evangelista, F. (2004) A Model for Predicting Damage Evolution in Heterogeneous Viscoelastic Asphaltic Mixtures. Transportation Research Record 2466, Transportation Research Board, Washington D.C., Estados Unidos.
- Santana, H. (1995) Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de filler em misturas asfálticas, 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.
- Shames, I.H. (1997) *Elastic and Inelastic Stress Analysis*, Taylor and Francis, revised printing, Washington DC, Estados Unidos.
- SHRP (1994) Stiffness of Asphalt – Aggregate Mixes, Strategic Highway Research Program A – 388, National Research Council, Washington, D.C.
- Silva, P. (1995) *Contribuição para o Aperfeiçoamento do Emprego do Programa FEPAVE2 em Estudos e Projetos de Pavimentos Flexíveis*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Schapery, R.A. (1984) Correspondence Principles and Generalized JIntegral for Large Deformation and Fracture Analysis of Viscoelastic Media, International Journal of Fracture, v. 25, p. 194-223.

Tayeballi, A.A., Deacon J.A., Coplantz, J. S. e Monismith C. L. (1993) Modeling Fatigue Response of Asphalt Aggregate Mixtures, Proceedings the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 62, p. 285-421.
Zollinger, C.J. (2005) *Application of Surface Energy Measurements to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt and Aggregates*, Tese de M. Sc., TAMU, College Station, Texas, Estados Unidos.

Endereço dos autores:

Texas A&M University, Texas Transportation Institute
Spence Street, Salas 601A e 603E, CEP: 77843-3135
College Station – Texas - Estados Unidos
e-mail: v-castelobranco@ttimail.tamu.edu, d-little@ttimail.tamu.edu

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia – Campus do Pici, S/Nº
Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, Dept. de Engenharia de Transportes Bloco: 703, CEP: 60455-970
Fortaleza – Ceará – Brasil
e-mail: jsoares@det.ufc.br