

Identificação do comportamento viscoelástico não-linear e do dano em misturas asfálticas utilizando testes de varredura de tensão

Renato Peixoto Coutinho¹, Reuber Arrais Freire²,
Verônica Teixeira Franco Castelo Branco³ e Jorge Barbosa Soares⁴

Resumo: Os materiais asfálticos apresentam comportamento que pode ser aproximado pela teoria da viscoelasticidade. Nesses materiais, é importante que seja feita a separação entre as respostas viscoelástica não-linear e de dano por fadiga. Este problema é complexo, pois nestas zonas (não-linear e dano) os materiais asfálticos apresentam comportamentos mecânicos semelhantes. Este trabalho apresenta um procedimento experimental e analítico para separação destas zonas em concretos asfálticos. Para isso foi utilizada uma máquina de teste universal (UTM-25) e ensaios de varredura de tensão em diferentes misturas asfálticas. Depois de coletados os valores de deslocamento, foi utilizada uma análise estatística para encontrar a tensão máxima que pode ser aplicada ao material sem que seja invocada a resposta referente ao dano por fadiga. Os resultados mostraram que o valor da tensão de transição está diretamente associado às propriedades do material, e que a rigidez pode ser um fator determinante.

Palavras-chave: misturas asfálticas, viscoelasticidade não-linear, dano por fadiga, varredura de tensão.

Abstract: Asphaltic materials are known to have a behavior that can be approximated by the viscoelasticity theory. In these materials it is essential to separate the nonlinear viscoelastic response from the fatigue damage response. This is a complex issue, because both nonlinearity and damage have a similar effect on the material mechanical behavior. This paper presents experimental and analytical procedures for separation of the nonlinear viscoelastic response from the fatigue damage in hot asphalt mixtures (HMA). A Universal Testing Machine 25 was used to perform stress sweep tests in three different HMAs. Once all the strain values were collected for each material, a statistical analysis was used to find the maximum stress that can be applied to the material without invoking the fatigue damage response. The results showed that the transition stress is directly associated with the material properties and stiffness can be a determining factor.

Keywords: asphalt mixtures, nonlinear viscoelasticity, fatigue damage, stress sweep.

1. INTRODUÇÃO

Inúmeros trabalhos publicados no Brasil e no exterior afirmam que materiais asfálticos apresentam comportamento que pode ser representado pelo modelo viscoelástico (Goodrich, 1991; Pinto, 1991; Lee e Kim, 1998; Park e Kim, 1998; Momm, 2001; Taira e Fabbri, 2001; Daniel e Kim, 2002; Soares e Souza, 2002; Souza e Soares, 2002). De maneira simples, os materiais viscoelásticos podem ser interpretados como uma combinação do comportamento de materiais elásticos e viscosos. Isto pode ser feito porque quando materiais viscoelásticos são submetidos a carregamentos rápidos (altas frequências), estes exibem um comportamento próximo ao dos sólidos elásticos. Em contrapartida, quando se aplicam carregamentos a uma taxa lenta (baixas frequências), o material apresenta deformações permanentes com o passar do tempo, assemelhando-se ao comportamento dos fluidos viscosos.

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) pode apresentar resposta elástica quando submetido a uma solicitação mecânica. Porém, este material também tem componentes viscosas que resultam em uma resposta dependente do tempo e da taxa de aplicação de carga (Christensen, 1982). Com o intuito de caracterizar corretamente os materiais asfálticos, é necessária a obtenção de parâmetros compatíveis com os efeitos viscoelásticos, permitindo o estudo e a análise de tensões (σ) e deformações (ϵ) (Huang, 2004; Evangelista *et al.*, 2006).

Os materiais viscoelásticos apresentam comportamento estrutural dependente do tempo e da taxa de aplicação de carga (ou deslocamento) (Schapery, 1969; Christensen, 1982). Além disso, estes materiais são caracterizados por apresentar uma resposta de deformação, em um dado instante, determinada não apenas pelo correspondente valor de tensão naquele instante, mas também por todo o histórico de tensão ao qual o material foi submetido (Christensen, 1982). Esta hipótese é válida tanto para materiais viscoelásticos lineares como para não-lineares. No entanto, a teoria da viscoelasticidade linear é restrita a condições de deformabilidade infinitesimal, as quais são satisfeitas em muitos problemas teóricos, mas não devem ser assumidas em alguns casos reais (Soares e Souza, 2002).

As propriedades viscoelásticas não-lineares dependem dos níveis de tensão e deformação aos quais o material é submetido. De acordo com Ferry (1961) e Cheung e Cebon (1997a; 1997b), os ligantes asfálticos se comportam linearmente a baixos níveis de tensão e não linearmente para níveis elevados de tensão. Além disso, a tensão (deformação) máxima que pode ser aplicada sem acionar a resposta

¹ Renato Peixoto Coutinho, Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Fortaleza, CE, Brasil. (e-mail: renato@det.ufc.br)

² Reuber Arrais Freire, Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Fortaleza, CE, Brasil. (e-mail: reuber_freire@det.ufc.br)

³ Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Campus do Pici, CE, Brasil. (e-mail: veronica@det.ufc.br)

⁴ Jorge Barbosa Soares, Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Fortaleza, CE, Brasil. (e-mail: jsoares@det.ufc.br)

Manuscrito recebido em 26/6/2011 e aprovado para publicação em 4/11/2011. Este artigo é parte de TRANSPORTES v.19, n.3, 2011. ISSN: 2237-1346 (online).

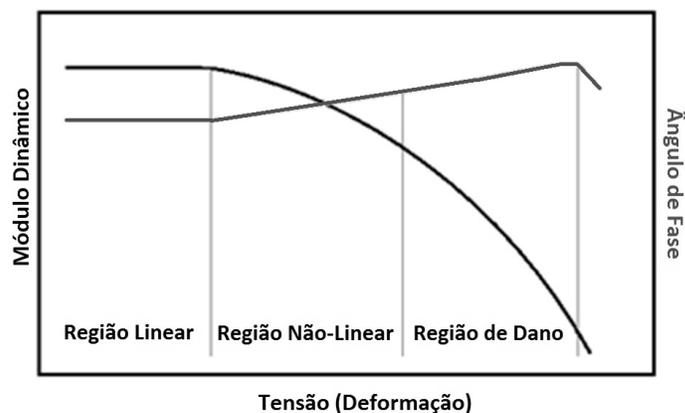


Figura 1. Comportamento do módulo dinâmico e do ângulo de fase para diferentes níveis de tensão (deformação)

não-linear do material depende do tipo de material e da temperatura utilizada. De acordo com Schapery (1969), os principais parâmetros viscoelásticos, como o módulo dinâmico e o ângulo de fase, são definidos em condições de viscoelasticidade linear. Porém, os materiais asfálticos podem exibir tanto o comportamento linear quanto o comportamento não-linear. Ainda segundo Christensen (1982), a viscoelasticidade não-linear possui muitos aspectos em comum com a teoria da viscoelasticidade linear. Dentre eles, o aspecto mais fundamental é a hipótese da memória. O resultado (tensão/deformação) obtido de um material com comportamento linear ou não-linear não é determinado apenas pelo valor da sollicitação (deformação/tensão) naquele dado momento, mas também por todo o histórico de sollicitações que o material já sofreu.

Zeng (1997) afirma que a diferença entre estes dois tipos de comportamento (linear e não-linear) está na relação tensão/deformação. Ao contrário do que ocorre com os materiais com resposta linear, nos materiais não-lineares a tensão não é proporcional à deformação. Este comportamento não-linear pode ser ocasionado por diversos fatores como a natureza do material e a amplitude da tensão utilizada.

Bahia *et al.* (1999) apresentaram uma discussão onde foi afirmado que vários CAPs modificados compõem um sistema multifase que é conhecido por apresentar um comportamento não-linear, diferente do que é visto nos CAPs não-modificados. Airey *et al.* (2002) afirmaram que, para alguns casos de ligantes asfálticos modificados por polímero, principalmente com alta percentagem de agente modificador, o princípio da linearidade não deve ser admitido.

O dano por fadiga (formação e propagação de trincas) ocasionado por carregamento dinâmico repetido é um dos principais problemas que ocorrem nos materiais asfálticos. Este tipo de dano é provocado pelo tráfego de veículos e pela constante mudança nas condições climáticas às quais a mistura asfáltica está submetida. Um dos desafios na caracterização de dano por fadiga em misturas asfálticas é a separação da resposta viscoelástica da resposta ocasionada pelo desenvolvimento do dano por fadiga. A complexidade desta tarefa reside no fato de que tanto a não linearidade como o dano têm efeitos semelhantes na resposta mecânica dos materiais, isto é, diminuição do módulo dinâmico e aumento do ângulo de fase (Castelo Branco, 2008). Este comportamento é ilustrado na Figura 1.

Como pode ser observado na Figura 1, o ponto de transição da região não-linear para a região de dano por fadiga é

difícil de ser encontrado, tendo em vista que não ocorre mudança na tendência de diminuição do módulo dinâmico e de aumento do ângulo de fase. Neste artigo, considera-se não-linearidade como um fenômeno associado principalmente à grandes deformações na fase ligante, enquanto que o dano por fadiga seria associado primordialmente à formação e à propagação de trincas. O conhecimento deste limite de transição é importante para quantificar, de maneira eficiente, a energia que é dissipada durante o comportamento viscoelástico não-linear e durante a resposta de dano por fadiga em diferentes Concretos Asfálticos CAs, possibilitando uma análise mais realista do comportamento do material.

O presente trabalho tem como objetivo a elaboração e a aplicação de um procedimento experimental para a separação da resposta não-linear da resposta de dano por fadiga em diferentes Concretos Asfálticos (CAs). Para isso são realizados ensaios de varredura de tensão semelhante ao que foi proposto por Castelo Branco (2008) para a caracterização de Matrizes de Agregados Finos (MAFs).

2. INFORMAÇÕES EXPERIMENTAIS

2.1. Materiais

Esta pesquisa foi realizada com materiais do Brasil e da Espanha, como parte de um esforço cooperativo de pesquisa entre a Universidade Federal do Ceará (UFC) e o *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas* (CEDEX) que visa comparar materiais de pavimentação e ensaios dos respectivos países. Dentre os materiais brasileiros, foram utilizados dois diferentes tipos de ligantes asfálticos: (i) CAP 50/70 (produzido pela Petrobras/Lubnor) e (ii) CAP 50/70 + 4,5% em massa do copolímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS). Essa porcentagem de copolímero foi escolhida por ter sido sugerida no estudo de Bringel (2007). Existem outras pesquisas, com estes mesmos materiais, desenvolvidas no Laboratório Mecânica de Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (LMP/UFC), relativas à fadiga (Araújo Jr. *et al.*, 2009) e caracterização multiescala (Coutinho *et al.*, 2010).

O ligante modificado foi preparado em um misturador de alto cisalhamento de escala laboratorial, Silverson LAR[®]. No procedimento de preparação deste ligante, foi utilizada a rotação de 3.000 RPM e a temperatura de 160°C por um

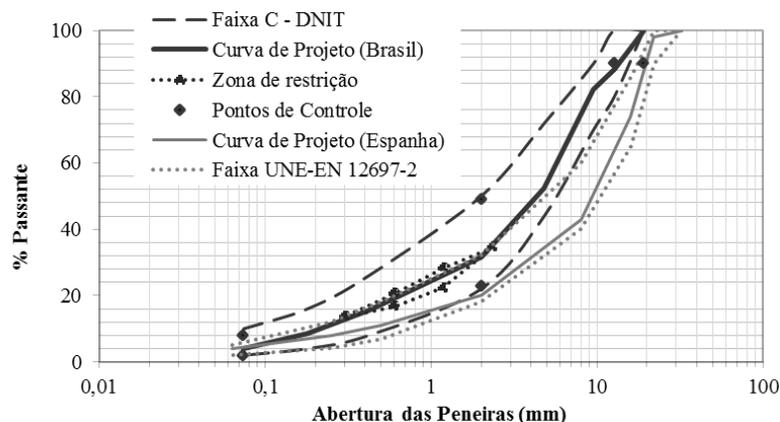


Figura 2. Granulometria dos CAs brasileiro e espanhol

Tabela 1. Parâmetros de dosagem

Parâmetros	Tipo de CAP na mistura		
	CAP 50/70 (Brasil)	CAP 50/70 + 4,5% SBS (Brasil)	CAP 50/70 (Espanha)
Ligante (%)	6,0	6,3	3,5
Volume de vazios (%)	4,1	4,2	6,7
G_{mm}	2,401	2,397	2,513 (DMT* = 2,550)

*DMT: densidade máxima teórica

Tabela 2. Tensões utilizadas para os ensaios de varredura de tensão dos CAs

Tensão (kPa)	CA Brasil	CA Brasil (Modificado)	CA Espanha
Inicial	300	300	300
Final	2.260	2.660	2.660

período de 2 horas. Os agregados brasileiros são de origem granítica e provenientes da Pedreira de Itaitinga, CE. Foram utilizados como agregado graúdo as britas 3/4" e 3/8", como agregado miúdo o pó-de-pedra proveniente da mesma pedreira e como material de enchimento utilizou-se o filler natural. Dentre os materiais espanhóis, também foi utilizado um CAP 50/70. Os agregados graúdos são silico-calcários e os miúdos são de origem calcária, todos oriundos de Madri.

2.2. Dosagem

A dosagem das misturas brasileiras foi realizada seguindo a especificação Superpave para misturas asfálticas usando um N de projeto igual a 100 giros. Foram moldados corpos-de-prova (CPs) cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura. A dosagem espanhola seguiu o método Marshall, e a mistura investigada é tipicamente utilizada para revestimentos com alto coeficiente de drenagem e fricção. As granulometrias das misturas, os limites estabelecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para a faixa C e a faixa espanhola para misturas do tipo AC22G são apresentados na Figura 2, que inclui a distribuição dos agregados nas misturas asfálticas do Brasil e da Espanha. A granulometria brasileira é a mesma, independentemente do ligante, puro ou modificado. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de dosagem para as misturas, sendo os mesmos calculados a partir da média de três amostras.

2.3. Procedimentos experimentais

O procedimento experimental para este estudo foi desenvolvido a partir daquele idealizado por Castelo Branco

(2008), no qual foram realizados testes de varredura de tensão e deformação para separar a zona viscoelástica não-linear da zona de dano por fadiga em amostras de seis MAFs distintas. Os resultados deste estudo demonstraram que o valor da tensão/deformação limite encontrada foi sensível ao tipo de ligante e/ou agregado utilizado nas misturas. Estes limites foram posteriormente utilizados para previsão do comportamento viscoelástico não-linear e de resistência ao dano por fadiga em materiais asfálticos utilizando conceitos de energia dissipada no processo.

Para as amostras de CAs avaliadas na presente pesquisa, foram realizados ensaios de varredura de tensão na máquina de teste universal (UTM-25). Em cada ensaio foram aplicadas 50 diferentes amplitudes de tensões axiais compressivas (separadas por intervalos iguais) na forma semi-senoidal sobre a amostra a uma frequência fixa de 10 Hz, temperatura controlada em 21,1°C e 200 ciclos de aplicação de carga para cada amplitude de tensão (Tabela 2). A tensão inicial foi baseada na tensão mínima recomendada pela norma AASHTO TP 62-03 para o ensaio de módulo dinâmico em CAs. As deformações axiais foram medidas por três LVDTs com um intervalo de posicionamento de 120° entre eles. É importante salientar que estes ensaios foram iniciados com aplicação de baixas amplitudes e estas aumentaram gradativamente até atingir o objetivo do teste (passar da zona viscoelástica não-linear para a zona de dano por fadiga).

3. RESULTADOS E ANÁLISES

A resposta de deformação para cada amplitude de tensão foi monitorada. Sabe-se que à medida que a amplitude de

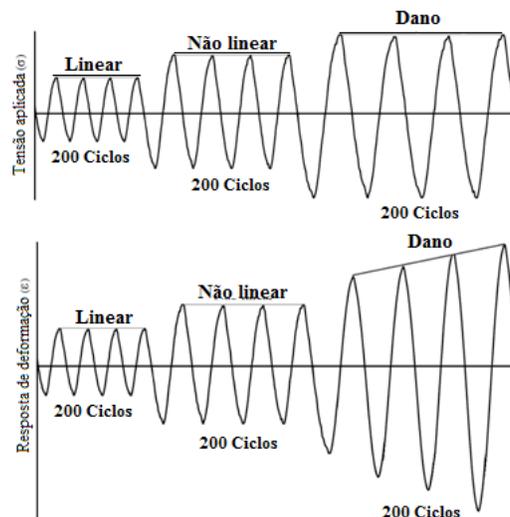


Figura 3. Tensão aplicada e resposta de deformação para as três zonas

tensão aumenta a resposta de deformação se comporta de maneira diferente. Este comportamento pode ser dividido em três diferentes estágios. No primeiro estágio, zona linear, a resposta de deformação é linear com respeito à amplitude de tensão aplicada. Trata-se de um estágio com baixos níveis de tensões. O segundo intervalo, zona não-linear, se caracteriza pela não linearidade da resposta de deformação e geralmente ocorre para níveis de tensões intermediários. O último intervalo, zona de dano, é caracterizado pelo dano por fadiga que é adicionado ao material em cada ciclo de carga durante a aplicação de altas amplitudes de tensão. Este último intervalo também é caracterizado pela não linearidade da resposta de deformação com relação à tensão aplicada.

Nos dois primeiros estágios, quando a resposta é linear e não-linear, a deformação não deve sofrer alterações à medida que se aumenta a quantidade de ciclos de aplicações de carga para uma mesma amplitude de tensão (Figura 3). Por outro lado, no estágio de dano, para uma mesma amplitude de tensão a resposta de deformação tende a aumentar à medida que se eleva a quantidade de ciclos de aplicação de carga (Figura 3). Além disso, para a zona linear a relação tensão/deformação (módulo dinâmico) é constante independente da amplitude de tensão utilizada. Por outro lado, para a zona não-linear, a relação tensão/deformação é diferente para cada amplitude de tensão que é aplicada (Figura 1).

A análise da resposta de deformação para cada uma das 50 amplitudes de tensão utilizadas durante 200 ciclos de aplicação de carga possibilita a identificação do ponto de mudança do comportamento viscoelástico não-linear para o comportamento com inclusão de dano por fadiga. Quantitativamente, o valor da amplitude de tensão onde ocorre a mudança da resposta viscoelástica não-linear para a zona de dano por fadiga pode ser obtida através da determinação da inclinação da reta que liga os picos de deformações respostas para os 200 ciclos para cada amplitude de tensão. Caso o material esteja na zona viscoelástica linear ou não-linear, a inclinação da reta deve ser zero ou um valor bem próximo a este. Caso contrário, o material estará na zona de dano por fadiga (Figura 3). Para encontrar o valor de transição é feita uma análise estatística dos resultados, conforme apresentado na próxima seção.

3.1. Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada por um algoritmo proposto por Castelo Branco (2008). Esta análise tem como objetivo determinar o valor da amplitude de tensão na qual o dano é iminente para as diferentes misturas asfálticas avaliadas neste estudo. Este algoritmo se baseia na análise da inclinação da reta de tendência (y) gerada pelos picos de deformação respostas obtidos nos 200 ciclos de carregamento aplicados e nos valores de tensão (x) para os quais essas inclinações foram determinadas.

Durante a análise, o algoritmo ajusta os dados com uma linha horizontal ($y = \alpha_0$) conectado ao ponto x_0 seguido por uma função linear ($y = \beta_0 + \beta_1 x$). O ponto x_0 é chamado de ponto de transição e pode ser interpretado como o ponto onde a derivada de y passa a ser diferente de zero (Castelo Branco, 2008). Este algoritmo é baseado no método dos mínimos quadrados para restringir o cruzamento das duas partes da função no ponto x_0 . Sendo $x_{(i)}$ os valores de x e $y^*_{(i)}$ a resposta correspondente a $x_{(i)}$, a função a ser minimizada é:

$$\min \left\{ \sum_{i: x_{(i)} < x_0} (y^*_{(i)} - \alpha_0)^2 + \sum_{i: x_{(i)} \geq x_0} [y^*_{(i)} - [\beta_0 + \beta_1 x(i)]]^2 \right\}. \quad (1)$$

Considerando que $y = \beta_0 + \beta_1 x$ passe através de (x_0, α) com respeito a $\alpha_0, \beta_0, \beta_1$ e x_0 para o caso da função ser considerada como linear, sendo $\alpha_0, \beta_0, \beta_1$ e x_0 as constantes das equações lineares. Esta minimização é atingida selecionando primeiro uma grade de pontos e convergindo o intervalo de dados de x que correspondem aos potenciais valores de x_0 . Então, para cada valor potencial de x_0 , ao longo desta grade, a minimização de $\alpha_0, \beta_0, \beta_1$ e x_0 é realizada usando a ferramenta *Solver* do *Excel*.

3.2. Resultados

As respostas de deformação foram obtidas para as três misturas que estão sendo estudadas neste trabalho. Para cada mistura foram realizados três ensaios. A partir destas respostas, foram obtidas as inclinações da reta que liga os picos de resposta de deformação dos 200 ciclos para cada amplitude de tensão aplicada. A partir destes resultados, os dados foram analisados utilizando o método estatístico de-

fi
os
vi
fa
na

tu
ac
po
gi
a
m
Fi
to
pi
de
qu
tr
fl
p
le
cc
tr

Tabela 3. Parâmetros estatísticos para as misturas asfálticas estudadas

Parâmetros	CA Brasil	CA Brasil (Modificado)	CA Espanha
α_0	$5,9416 \times 10^{-6}$	$8,1113 \times 10^{-6}$	$6,3968 \times 10^{-6}$
β_0	$-3,5008 \times 10^{-5}$	$-4,4381 \times 10^{-5}$	$-5,4170 \times 10^{-5}$
β_1	$4,5673 \times 10^{-8}$	$3,8958 \times 10^{-8}$	$4,0351 \times 10^{-8}$
x_0 (kPa)	897	1.347	1.501

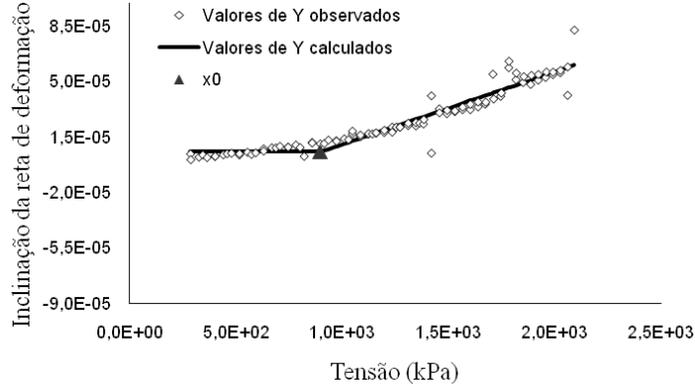


Figura 4. Tensão versus inclinação da reta que liga os picos de deformação, mistura brasileira com ligante convencional (CA Brasil)

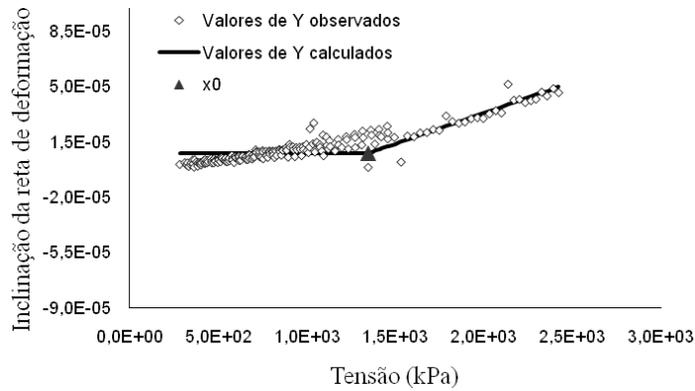


Figura 5. Tensão versus inclinação da reta que liga os picos de deformação, mistura brasileira com ligante modificado com 4,5% de SBS (CA Brasil modificado)

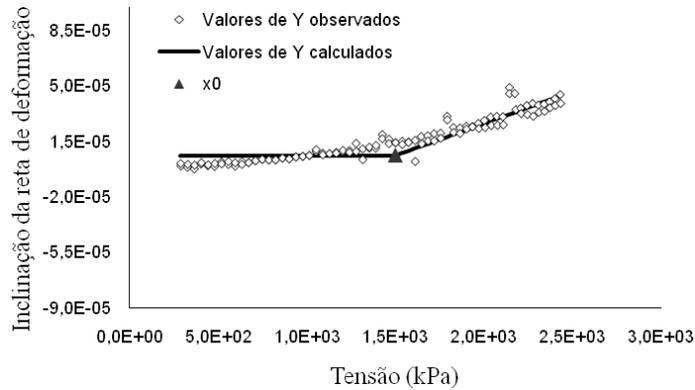


Figura 6. Tensão versus inclinação da reta que liga os picos de deformação, mistura espanhola (CA Espanha)

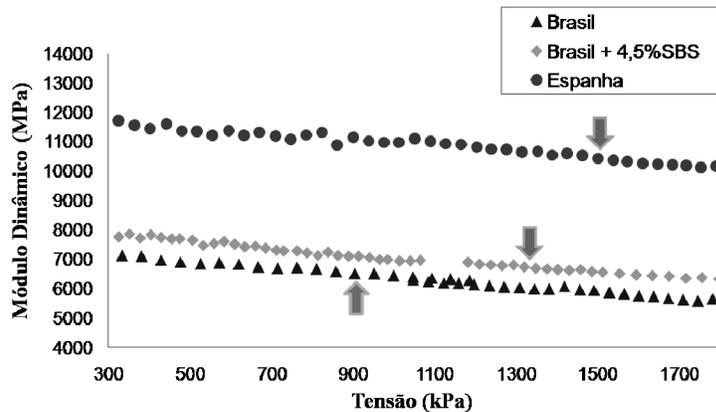


Figura 7. Relação entre o módulo dinâmico e os valores de tensões (as setas indicam os limites de transição entre as zonas visco-elástica não-linear e de dano)

Outro ponto importante a ser observado é que a mistura brasileira com ligante modificado por SBS apresentou um acréscimo significativo (450 kPa) no limite de transição para a zona de dano quando comparada com a mistura brasileira dosada com ligante convencional. Esse resultado pode vir a refletir em uma maior resistência ao dano por fadiga para a mistura com utilização de ligante modificado com SBS. Porém, é importante ressaltar que isto não indica que necessariamente materiais com maior limite de transição possuam necessariamente maior resistência ao dano por fadiga para qualquer histórico de tensão solicitante.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A partir dos ensaios de varredura de tensão realizados nos CAs avaliados neste estudo é observado que as três misturas analisadas se comportam de maneira bastante distinta. Os resultados de módulo dinâmico mostraram que a mistura espanhola possui rigidez superior se comparada às misturas brasileiras. Isso impactou diretamente no limite de transição da zona não-linear para a zona de dano por fadiga destas misturas. Os resultados deste trabalho mostraram que, para as misturas estudadas, quanto maior a rigidez do material, maior será a tensão na qual o material vai passar da zona viscoelástica não-linear para a zona onde ocorre o dano por fadiga. Outra conclusão importante é que o CA brasileiro dosado com ligante modificado possui maior rigidez e maior tensão de transição se comparado ao CA brasileiro dosado com ligante convencional.

Os autores sugerem que o procedimento de ensaio e análise proposto neste trabalho seja estendido para outros tipos de CAs e até mesmo outras escalas de materiais asfálticos, como a MAF e o CAP, para que o limite de transição entre as zonas de viscoelasticidade não-linear e de dano seja melhor compreendido. Além disso, seria importante realizar ensaios em diferentes temperaturas e frequências de aplicação de carga, para que sejam simuladas as diversas condições que os CAs podem encontrar em campo. Por último, seria interessante realizar testes de linearidade nestes mesmos materiais para encontrar o limite de transição entre a zona viscoelástica linear e a não-linear. O conhecimento deste limite é importante pelo fato de que a maioria dos ensaios para obtenção das características viscoelásticas destes materiais são realizados tendo como premissa o fato de os mesmos encontrarem-se na zona linear.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, a ANP, a FINEP e a FUNCAP pelo apoio financeiro dado a esta pesquisa. À Lubnor pelo fornecimento do CAP e ao CEDEX pelo fornecimento dos materiais espanhóis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Airey, G. D.; B. Rahimzadeh e A. C. Collop (2002) Linear Viscoelastic Limits of Bituminous Binders. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, v. 71, p. 100–131.
- Bahia, H. U.; H. Zhai; K. Bonneti e S. Kose (1999) Non-Linear Viscoelastic and Fatigue Properties of Asphalt Binders. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, v. 68, p. 1–34.
- Bringel, R. M. (2007) *Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, Brasil.
- Castelo Branco, V. T. F. (2008) *A Unified Method for the Analysis of Nonlinear Viscoelasticity and Fatigue Cracking of Asphalt Mixtures Using the Dynamic Mechanical Analyzer*. Tese (doutorado). Texas A&M University, College Station, TX, Estados Unidos.
- Castelo Branco, V. T. F.; A. Bhasin; E. Masad; D. N. Little e J. B. Soares (2008) Separation of Nonlinear Viscoelastic Response from Fatigue Damage Using Dynamic Mechanical Analysis (DMA). *XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Vitória-ES.
- Cheung, C. Y. e D. Cebon (1997) Deformation Mechanisms of Pure Bitumen. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, v. 9, n. 3, p. 117–129.
- Cheung, C. Y. e D. Cebon (1997) Thin Film Deformation Behavior of Power-Law Creeping Materials. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 123, n. 11, p. 1138–1152.
- Christensen, R. M. (1982) *Theory of Viscoelasticity*. Academic Press, 2ª ed., New York.
- Coutinho, R. P.; T. F. Pamplona; V. T. F. Castelo Branco; J. B. Soares e A. Mateos (2010) Multiscale Approach for Characterization of Asphaltic Materials Designed in Brazil and Spain. *11th International Conference on Asphalt Pavements – ISAP*, Nagoya, Japão.
- Daniel, J. S. e Y. R. Kim (2002) Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic Continuum Damage Model. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, v. 71, p. 619–650.
- Evangelista Jr, F.; E. Parente Jr, e J. B. Soares (2005) Viscoelastic and Elastic Structural Analysis of Flexible Pavements. *XXVI Iberian Latin-American Congress Computational Methods in Engineering*, CILAMCE, Guarapari-ES.
- Ferry, J. D. (1961) *Viscoelastic Properties of Polymers*. John Wiley, Nova York.
- Goodrich, J. L. (1991) Asphaltic Binder Rheology, Asphalt Concrete Rheology and Asphalt Concrete Mix Properties. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, v. 60, p. 80–120.
- Huang, Y. H. (2004) *Pavement Analysis and Design*. Pearson, Upper Saddle River, NJ, EUA.

- Lee, H. J. e Y. R. Kim (1998) Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 124, n. 1, p. 32–40.
- Masad, E.; N. Somadevan; H. Bahia e S. Kose (2001) Modeling and Experimental Measurements of Strain Distribution in Asphalt Mixes. *Journal of Transportation Engineering*, v. 127, n. 6, p. 477–485.
- Momm, L. (2001) Comportamento Viscoelástico do Concreto Asfáltico. *33ª Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Florianópolis, p. 471–487.
- Park, S. W. e Y. R. Kim (1998) Analysis of Layered Viscoelastic System with Transient Temperatures. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 124, n. 2, p. 223–231.
- Pinto, S. (1991) *Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*. Tese (doutorado). COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.
- Schapery, R.A. (1969) On the Characterization of Nonlinear Viscoelastic Materials. *Polymer Engineering and Science*, v. 9, p. 295–310.
- Shields, D. H.; M. Zeng e R. Kwok (1998) Nonlinear Viscoelastic Behavior of Asphalt Concrete in Stress Relaxation. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, v. 67, p. 358–400.
- Soares, J. B. e F. V. Souza (2002) Verificação do Comportamento Viscoelástico Linear em Misturas Asfálticas. *16º Encontro de Asfalto*, IBP, Rio de Janeiro-RJ.
- Souza, F. V. e J. B. Soares (2002) Previsão do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Partir dos Resultados do Ensaio de Creep Estático. *XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Natal-RN, p. 29–41.
- Taira, C. e G. T. P. Fabbri (2001) Modelação Viscoelástica de Ensaio de Fluência Estática e Dinâmica de Misturas Asfálticas com Asfaltos Convencionais e Modificados por Polímero SBS. *33ª Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Florianópolis, p. 250–265.
- Zeng, M. (1997) *Nonlinear Viscoelastic Behavior of Asphalt Concrete in Stress Relaxation*. Dissertação (mestrado). University of Manitoba, USA.