

CONSIDERAÇÕES SOBRE MÓDULO RESILIENTE E MÓDULO DINÂMICO EM MISTURAS ASFÁLTICAS COM BASE NA TEORIA DA VISCOELASTICIDADE

Soares, Jorge Barbosa

Professor Adjunto

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - PETRAN

Departamento de Engenharia de Transportes - DET

Universidade Federal do Ceará - UFC

Souza, Flávio Vasconcelos de

Bolsista de Mestrado

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - PETRAN

Departamento de Engenharia de Transportes - DET

Universidade Federal do Ceará - UFC

RESUMO

É comum considerar-se o comportamento do revestimento asfáltico como elástico linear na análise de tensões e deslocamentos em pavimentos. Para tanto, geralmente considera-se o módulo de Young da mistura asfáltica igual ao módulo resiliente ou ao módulo dinâmico. Sabe-se, contudo, que os materiais asfálticos apresentam comportamento viscoelástico, ou seja, seu comportamento é dependente do tempo e da taxa de aplicação de carga (ou deslocamento). Desta forma, percebe-se que, além de não permitir uma simulação do real comportamento do pavimento ao longo do tempo, a análise elástica impossibilita uma modelagem mais realista de fenômenos importantes para a previsão de desempenho de pavimentos asfálticos, como trincamento por fadiga, deformações permanentes e recuperação de trincas. O presente estudo mostra, com base na teoria da viscoelasticidade linear, que o módulo resiliente e o módulo dinâmico não são parâmetros puramente elásticos, dado que durante esses ensaios desenvolvem-se deformações viscoelásticas. Interpreta-se por fim o efeito do uso dos referidos parâmetros na análise estrutural elástica de pavimentos asfálticos.

1. INTRODUÇÃO

Observa-se nas últimas décadas uma maior utilização de métodos de dimensionamento de pavimentos que buscam compatibilizar as ações solicitantes do tráfego com a capacidade dos materiais por meio da análise estrutural de sistemas em camadas (Motta, 1991; Huang, 1993; Medina, 1997). Visto que o estado de tensões desenvolvido em pavimentos sob condições reais é complexo, não havendo solução analítica, é comum a utilização de ferramentas numéricas no cálculo dessas tensões. Dentre as ferramentas mais usadas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) destaca-se pela relativa simplicidade e possibilidade de utilização de diversos modelos constitutivos e de modelos de formação e propagação de trincas.

Para a solução de problemas estruturais, por métodos numéricos ou analíticos, é necessário que se defina, basicamente, a geometria do problema, as condições de contorno (carga e deslocamento) e as propriedades dos materiais (Allen e Haisler, 1985). Os modelos constitutivos comumente adotados na análise estrutural de pavimentos asfálticos são (i) elástico linear para a camada de revestimento e (ii) elástico não linear para as camadas subjacentes.

Os materiais asfálticos, no entanto, apresentam comportamento viscoelástico, ou seja, seu comportamento estrutural depende do tempo e da taxa de aplicação de carga (ou deslocamento) (Schapery, 1969, 1974; Christensen, 1982). Na literatura tem-se enfatizado a importância da consideração do comportamento viscoelástico de materiais asfálticos (Goodrich, 1991; Pinto, 1991; Park e Kim, 1998; Lee e Kim, 1998; Momm, 2001; Taira e Fabri 2001; Daniel e Kim, 2002; Souza e Soares, 2002; Soares e Souza, 2002; Souza e Soares, 2003), sendo que algumas especificações consideram a viscoelasticidade quando da caracterização reológica de materiais asfálticos, especialmente as relacionadas aos ligantes (AFNOR, 1993; SHRP, 1994; LCPC, 1997). Além disso, alguns trabalhos consideram o comportamento viscoelástico do revestimento asfáltico no cálculo de tensões e deslocamentos (Huang, 1993; Hopman, 1994; Souza e Soares, 2003).

Os modelos constitutivos requerem o fornecimento das propriedades dos materiais como parâmetros de entrada. Por exemplo, no caso do modelo elástico linear, os parâmetros de entrada são o módulo de Young e o coeficiente de Poisson (Love, 1944). Portanto, as propriedades dos materiais constituintes das diversas camadas devem ser determinadas em laboratório com o objetivo de serem utilizadas na análise estrutural do pavimento em estudo.

Quando se assume que as misturas asfálticas se comportam de maneira elástica linear, é comum considerar-se o módulo de Young com valor numericamente igual ao módulo resiliente ou ao módulo dinâmico (complexo) (Tonial, 2001). Para o caso de materiais elásticos, o valor numérico dos três módulos é o mesmo. Entretanto, para materiais viscoelásticos, o módulo de Young não pode obviamente ser usado, e os módulos resiliente e dinâmico diferem entre si.

O objetivo do presente trabalho é investigar os ensaios de módulo resiliente e módulo dinâmico à luz da teoria da viscoelasticidade linear. Além disso, mostra-se o efeito da utilização do módulo resiliente e do módulo dinâmico como um parâmetro de entrada na análise elástica de pavimentos asfálticos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Devido à dependência do tempo e da taxa de aplicação de carga (ou deslocamento), as equações constitutivas dos materiais viscoelásticos deixam de ser algébricas, como é o caso das relações elásticas, e passam a ser representadas por integrais de convolução (Volterra, 1959; Schapery, 1974; Christensen, 1982). Para o caso uniaxial, as relações tensão-deformação dos materiais viscoelásticos lineares são dadas pelas Equações 1 e 2, abaixo.

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \partial \tau \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t-\tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \partial \tau \quad (2)$$

onde $E(t)$: módulo de relaxação;
 $D(t)$: função fluência (*creep compliance*);
 t : tempo contado a partir de um referencial qualquer; e
 τ : tempo contado a partir do início da aplicação da carga.

O módulo de relaxação é obtido do ensaio de relaxação, que consiste da aplicação de uma deformação uniaxial constante, ε_0 , sendo $E(t) = \sigma(t)/\varepsilon_0$. Já a função fluência, é obtida através do ensaio de *creep*, que consiste da aplicação de uma tensão uniaxial constante, σ_0 , sendo $D(t) = \varepsilon(t)/\sigma_0$. Note-se que o módulo de relaxação e a função fluência não são funções recíprocas, mas relacionadas pela Equação 3 (Ferry, 1980).

$$\int_0^t E(t-\tau)D(\tau)d\tau = t \quad \text{para } t > 0 \quad (3)$$

Para que as Equações 1 e 2 possam ser resolvidas, é necessário que se utilize uma função matemática capaz de descrever as funções $E(t)$ e $D(t)$ no domínio de integração com relação ao tempo. As funções mais comumente usadas para representar o comportamento observado em laboratório das funções $E(t)$ e $D(t)$ de sólidos viscoelásticos são as séries de Prony, dadas pelas Equações 4 e 5, respectivamente. Note-se que estas equações correspondem aos modelos de Maxwell generalizado (Wiechert) (Figura 1a) e Voigt generalizado (Figura 1b), respectivamente.

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^N E_i \cdot e^{-\frac{t}{\rho_i}} \quad (4)$$

$$D(t) = D_0 + \sum_{i=1}^N D_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (5)$$

onde: $E_\infty, E_i, \rho_i, D_0, D_i$ e τ_i : coeficientes das séries de Prony;
 N : número de termos.

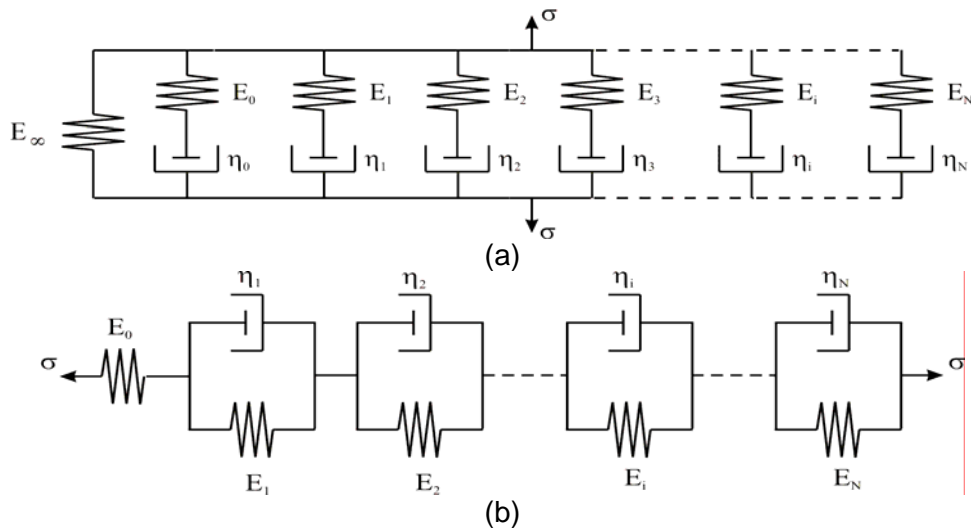


Figura 1: Modelos viscoelásticos: (a) Maxwell generalizado (Wiechert); (b) Voigt generalizado

Para o caso de aplicação de deformação e tensão harmônicas, pode-se determinar tanto o módulo complexo, $E^*(i\omega)$, como a função fluência complexa, $D^*(i\omega)$. Neste caso, $E^*(i\omega)$ e $D^*(i\omega)$ são funções recíprocas. Note-se que E^* e D^* são funções da frequência de aplicação

de deformação e tensão, ω , e não do tempo. As séries de Prony usadas na representação das funções $E^*(i\omega)$ e $D^*(i\omega)$ para sólidos viscoelásticos são dadas pelas Equações 6 e 7.

$$E^*(i\omega) = E_\infty + \sum_{i=1}^N \frac{i\omega\rho_i E_i}{i\omega\rho_i + 1} \quad (6)$$

$$D^*(i\omega) = D_0 + \sum_{i=1}^N \frac{D_i}{i\omega\tau_i + 1} \quad (7)$$

As Equações 6 e 7 podem ser ainda representadas na forma de números complexos, conforme as Equações 8 e 9, respectivamente. Note-se que o sinal negativo na Equação 9 é comumente usado para que D'' se torne uma função não negativa da frequência.

$$E^* = E' + i \cdot E'' \quad (8)$$

$$E' = E_\infty + \sum_{i=1}^N \frac{\omega^2 \rho_i^2 E_i}{\omega^2 \rho_i^2 + 1} \quad (8.1)$$

$$E'' = \sum_{i=1}^N \frac{\omega\rho_i E_i}{\omega^2 \rho_i^2 + 1} \quad (8.2)$$

$$D^* = D' - i \cdot D'' \quad (9)$$

$$D' = D_0 + \sum_{i=1}^N \frac{D_i}{\omega^2 \tau_i^2 + 1} \quad (9.1)$$

$$D'' = \sum_{i=1}^N \frac{\omega\tau_i D_i}{\omega^2 \tau_i^2 + 1} \quad (9.2)$$

É importante salientar que, de acordo com a teoria da viscoelasticidade, as propriedades complexas, $E^*(\omega)$ e $D^*(\omega)$, e as transientes, $E(t)$ e $D(t)$, podem ser inter-relacionadas (Christensen, 1982). Assim sendo, as solicitações harmônicas são de grande importância para a caracterização acelerada de materiais asfálticos, pois através de ensaios harmônicos, que necessitam de um curto intervalo de tempo para sua realização, pode-se determinar mais rapidamente as funções $E(t)$ e $D(t)$ para um longo domínio de tempo (Berthelot e Allen, 2002). Vale ressaltar que a utilização do princípio de superposição tempo-temperatura também é de grande importância na caracterização acelerada das propriedades viscoelásticas (Christensen, 1982).

Note-se ainda que, dado que as Equações 4 e 6 representam o mesmo conjunto mola-amortecedor (Figura 1a), os coeficientes da série de Prony representada pela Equação 6 são os mesmos da Equação 4. Desta forma, determinados os coeficientes da Equação 6,

pode-se obter a função $E(t)$ a partir da substituição dos valores desses coeficientes na Equação 4. Isto também vale para as funções *compliance* (funções fluência) dadas pelas Equações 5 e 7.

3. ENSAIO DE MÓDULO DINÂMICO (OU COMPLEXO)

O ensaio de módulo dinâmico, ou módulo complexo, consiste da aplicação de um carregamento senoidal, sendo a deformação do corpo de prova obtida ao longo do ensaio (Yoder e Witczak, 1975). Para materiais elásticos, os picos de tensão e deformação coincidem no mesmo instante de tempo. Para os materiais asfálticos, entretanto, a deformação é defasada de um certo tempo devido ao seu comportamento viscoelástico. Essa defasagem é denominada de ângulo fase, δ , conforme mostra a Figura 2. Logo, conclui-se que, para materiais elásticos, $\delta = 0$.

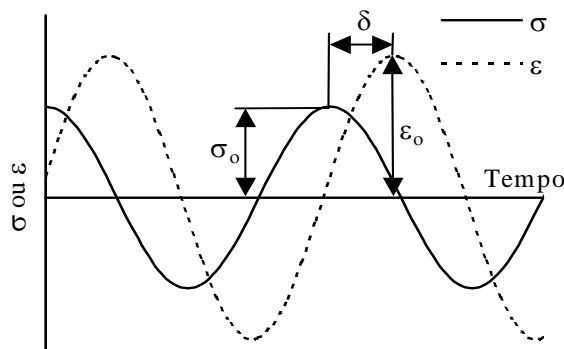


Figura 2: Desenho esquemático do comportamento viscoelástico sob carregamento harmônico

É possível mostrar que, a partir das Equações 8 e 9, para um carregamento senoidal dado por $\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$, a resposta de deformação na condição de estado permanente (ou constante) é dada por $\varepsilon(t) = \sigma_0 \cdot |D^*| \cdot \text{sen}(\omega t - \delta)$. Note-se que o estado permanente é atingido após um certo período de tempo de aplicação do carregamento.

Souza e Soares (2002), no entanto, determinaram, para condições isotérmicas, a resposta de deformação para todo o histórico de solicitação senoidal, e não apenas para o estado permanente, a qual pode ser obtida a partir da Equação 2, considerando-se a função fluência representada por uma série de Prony (Equação 5) e através da utilização da transformada de Laplace, que é um operador matemático que auxilia na resolução de equações diferenciais e integrais (Spiegel, 1971). A solução obtida em Souza e Soares

(2002), após um período suficiente de tempo, ou seja, quando o estado permanente é atingido, é dada pela Equação 10.

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(D_0 \text{sen}(\omega \times t) + \sum_{i=1}^N D_i \left(\frac{-\tau_i \times \omega \times \cos(\omega \times t) + \text{sen}(\omega \times t)}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \right) \right) \quad (10)$$

É importante observar que, mesmo sob condições isotérmicas, a resposta de deformação (Equação 10), assim como $E^*(i\omega)$ e $|E^*(i\omega)|$, são dependentes da frequência de aplicação da carga, ω . Note-se ainda que, embora possa ser matematicamente relacionada a $E(t)$, a função $E^*(i\omega)$, pode ser usada diretamente apenas nos casos de solicitações senoidais. Para outros tipos de solicitação, pode-se calcular $E(t)$ a partir $E^*(i\omega)$ a fim de utilizá-la na Equação 1. Portanto, pode-se concluir que não se devem utilizar valores de $E^*(i\omega)$, ou $|E^*(i\omega)|$, na análise elástica de pavimentos asfálticos, que são submetidos à ação de cargas semi-senoidais.

4. ENSAIO DE MÓDULO RESILIENTE (MR)

O ensaio de MR consiste da aplicação de pulsos de carga semi-senoidais de duração de 0,1s e repouso de 0,9s, sendo a deformação monitorada ao longo do ensaio. Os procedimentos desse ensaio estão descritos em ASTM (1982) e DNER (1994). A determinação do MR para misturas asfálticas pode ser feita, basicamente, através dos ensaios de compressão diametral e compressão uniaxial (Yoder e Witczak, 1975; Huang, 1993). No Brasil, é mais comum a utilização do ensaio de compressão diametral (DNER, 1994), que foi recentemente descontinuado nos Estados Unidos com o objetivo de ser estudado mais profundamente.

Para a análise estrutural de meios considerados isotrópicos, é necessária apenas a determinação das propriedades do material em uma única direção (solicitação uniaxial), já que as propriedades são assumidas independentes da direção (Allen e Haisler, 1985). Assim sendo, como o ensaio de compressão diametral gera um estado biaxial de tensões, adotou-se, por simplicidade de análise, o MR uniaxial no presente estudo.

Para se calcular o valor do MR uniaxial de misturas asfálticas pode-se usar a seguinte equação (Huang, 1993):

$$MR = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon(t = 1s)} \quad (11)$$

onde: σ_0 : pico da tensão solicitante;
 ε_{\max} : máxima deformação sofrida ao longo do ciclo de carga;
 $\varepsilon(t = 1s)$: deformação no final do ciclo, $t = 1,0s$;
 $\varepsilon_{\max} - \varepsilon(t = 1s)$: deformação recuperável.

Note-se, portanto, que, para materiais viscoelásticos, o MR varia tanto com o tempo de aplicação da carga como com o tempo de repouso, uma vez que a deformação recuperável depende dos mesmos. Vale ressaltar que, para materiais viscoelásticos lineares, embora a deformação total varie com o número de ciclos de aplicação de carga devido ao acúmulo de deformações não-recuperáveis, a deformação recuperável deve se manter constante ao longo dos ciclos.

Assim como para o ensaio de módulo dinâmico, a resposta de deformação para o ensaio de MR pode ser obtida a partir da Equação 2 (Souza e Soares, 2002). A Figura 3, retirada de Souza e Soares (2003), mostra a evolução das deformações para um ciclo e sua decomposição nas parcelas elástica e viscoelástica.

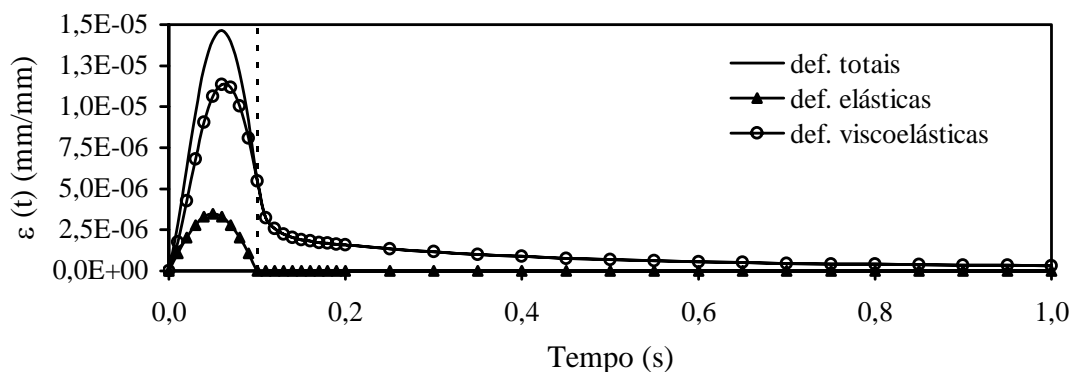


Figura 3: Decomposição das deformações desenvolvidas no ensaio de MR

Souza e Soares (2003) mostraram através do Método dos Elementos Finitos (MEF) que a resposta estrutural de um pavimento asfáltico sob a ação de uma carga semi-senoidal obtida através de um modelo elástico, para o qual assumiu-se um módulo de Young igual ao MR, se aproxima da resposta obtida pelo modelo viscoelástico para um tempo de carregamento de 0,1s, o que era esperado, uma vez que o MR é determinado em laboratório para um tempo de carregamento de 0,1s.

Nota-se, portanto, que o MR não representa um parâmetro puramente elástico para misturas asfálticas, uma vez que no seu cálculo associado a um dado pulso de carregamento,

desenvolvem-se deformações viscoelásticas que são contabilizadas como deformações elásticas. Ou seja, as deformações totais indicadas na Figura 3 são assumidas elásticas, muito embora fique claro na referida figura que a contribuição puramente elástica nas deformações totais é pequena quando comparada a contribuição viscoelástica.

Para o caso de tensão controlada, a propriedade puramente elástica está relacionada ao parâmetro D_0 da função fluência. Considerando-se o modelo de Voigt generalizado, esta propriedade está relacionada à mola associada em série com os demais conjuntos mola-amortecedor. A resposta viscoelástica, no entanto, está relacionada aos conjuntos mola-amortecedor, como mostra a Figura 4. Observe-se que quando o modelo da Figura 4 é submetido à uma tensão constante aplicada instantaneamente, a deformação instantânea se deve somente à mola associada em série. Porém, à medida que o tempo passa, os amortecedores relaxam, permitindo que as molas a eles associadas em paralelo também se deformem. Como estas deformações não são instantâneas, mas dependentes do tempo, estas são chamadas de deformações viscoelásticas, sendo que a deformação viscoelástica total é dada pela soma das contribuições dos diversos conjuntos mola-amortecedor.

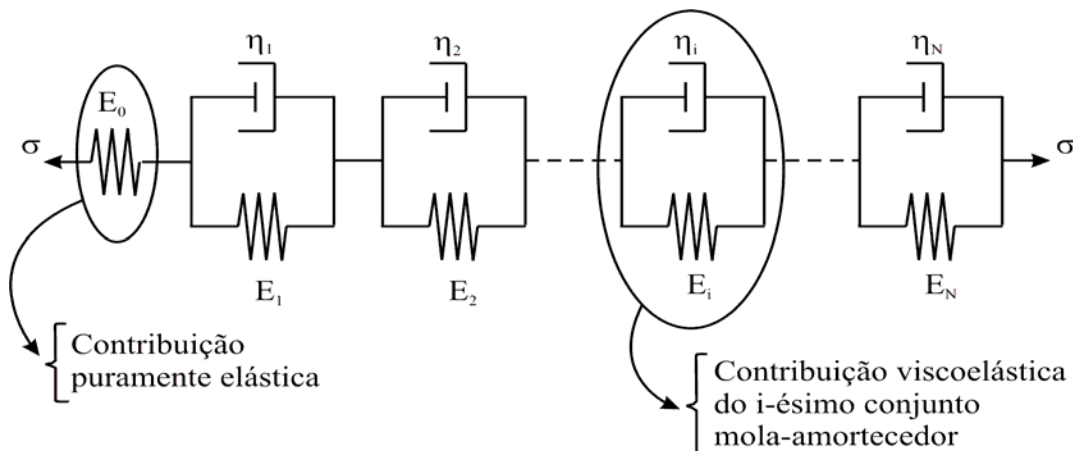


Figura 4: Interpretação do modelo de Voigt generalizado

5. EXEMPLO NUMÉRICO

Considerando-se as propriedades viscoelásticas, quais sejam, coeficientes das séries de Prony para a função fluência (Equação 5), extraídas de Gibson *et al.* (2002) e apresentadas na Tabela 1, pode-se calcular os valores de módulo resiliente e módulo dinâmico para a mistura analisada.

Para o caso do módulo resiliente, considerando-se uma solicitação uniaxial semi-senoidal com 0,1s de aplicação de carga, 0,9s de repouso e pico de tensão de 0,1MPa, e utilizando-se as equações de previsão de deformação propostas por Souza e Soares (2002), dados os termos da função fluência mostrada na Tabela 1, obtém-se os resultados de deformação mostrados na Figura 3. A partir desses resultados, pode-se calcular o valor do MR uniaxial (Huang, 1993) da mistura por meio da Equação 11, donde obtém-se:

$$MR_{CBUQ} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon(t = 1s)} = 6.978\text{MPa}$$

Tabela 1: Propriedades viscoelásticas para um CBUQ à temperatura de referência de 25°C

i / j	Função fluência	
	D_j (MPa ⁻¹)	τ_j (segundos)
	$D_0 = 3,459\text{E-}05$	-
1	9,042E-05	1,125E+07
2	1,885E-04	6,004E+05
3	3,525E-04	3,204E+04
4	5,769E-04	1,710E+03
5	5,955E-04	9,125E+01
6	3,396E-04	4,870E+00
7	1,405E-04	2,599E-01
8	5,670E-05	1,387E-02
9	2,367E-05	7,402E-04
10	1,172E-05	3,950E-05
11	4,222E-06	2,108E-06
12	-6,095E-08	1,125E-07

O módulo dinâmico pode ser calculado a partir da Equação 10, a qual corresponde ao estado permanente. Para a freqüência de 5Hz, que corresponde a um tempo de ciclo de 0,2s e um tempo de aplicação semi-senoidal de 0,1s (ciclo correspondente ao carregamento adotado na determinação do MR) e uma tensão de pico, σ_0 , de 0,1 MPa, obtém-se o histórico de deformações mostrado na Figura 5.

Assim sendo, pode-se calcular o valor de $|E^*|$, como segue:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = 7.669\text{MPa}$$

Note-se, portanto, que os valores de MR e $|E^*|$ diferem entre si, mesmo para carregamentos com tempos de aplicação de carga correspondentes. Vale ressaltar ainda que o MR varia tanto com o tempo de carregamento, como com a temperatura na qual o ensaio é realizado, enquanto que E^* e, conseqüentemente, $|E^*|$, variam com a freqüência e a temperatura.

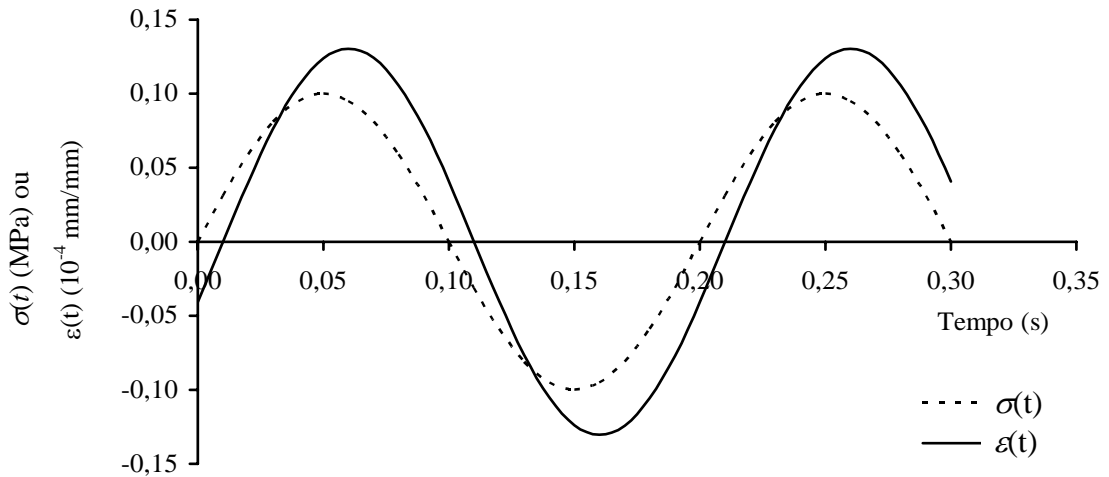


Figura 5: Tensão senoidal aplicada e resposta de deformações (Equação 11)

Caso se deseje utilizar uma análise elástica de pavimentos asfálticos para obter resultados aproximados quanto aos valores de pico, deve-se usar um ensaio cujo carregamento aplicado tenha a mesma forma e tempo de aplicação do carregamento a ser aplicado na análise elástica, ou seja, no caso da análise de pavimentos sujeitos à ação de pulsos semi-senoidais, deve-se aproximar o módulo elástico pelo MR, e não pelo $|E^*|$ (Souza e Soares, 2003). A Figura 6 mostra que o valor de pico da deflexão no centro do carregamento obtido pela análise elástica (MR determinado para 0,1s de carregamento) de um pavimento se aproxima do obtido pela análise viscoelástica para um tempo de carregamento de 0,1s.

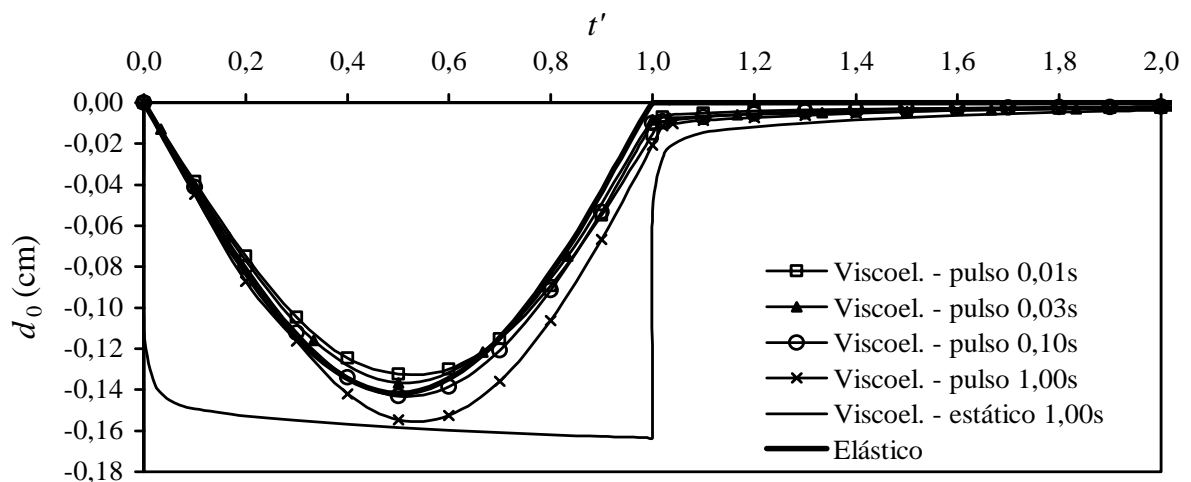


Figura 6: Deflexão máxima de superfície (centro da área de carregamento) (Souza e Soares, 2003)

É importante notar que os resultados obtidos para tempos após o pico diferem entre as análises elástica e viscoelástica, devido ao retardamento ocasionado pelo comportamento

viscoelástico do revestimento. Este retardamento pode inclusive gerar tensões de compressão no fundo do revestimento sob o centro do carregamento nos instantes finais do ciclo de aplicação de carga, ou seja, o ponto localizado no fundo do revestimento sob o centro da área de carregamento pode passar de um estado de tração para um estado de compressão num determinado instante de tempo (Figura 7). Este estado de compressão pode implicar numa maior vida de fadiga da camada de superfície, dado que o fenômeno de recuperação de trincas (*healing*) se dá mais rapidamente caso as faces da trinca estejam comprimidas uma contra a outra (Schapery, 1989; Kim *et al.*, 1990). Tal fato não é detectado na análise elástica.

Vale ressaltar que, além de não permitir uma visualização do real comportamento do pavimento ao longo do tempo, a análise elástica impossibilita uma modelagem mais realista de fenômenos importantes para a previsão do desempenho de pavimentos asfálticos, como trincamento por fadiga, deformações permanentes e recuperação de trincas (*fracture healing*).

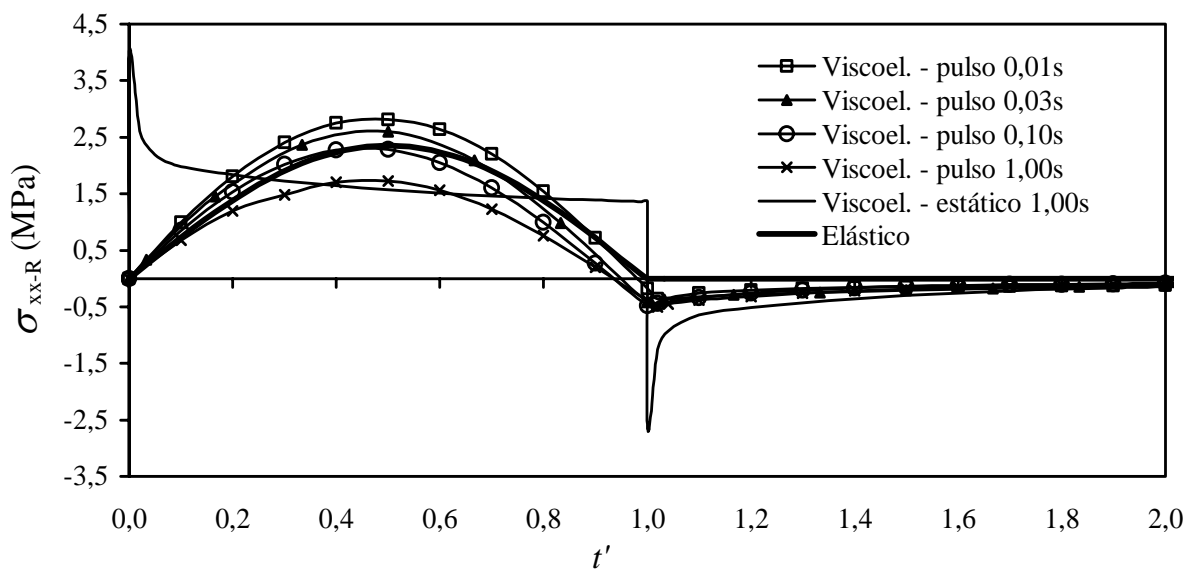


Figura 7: Tensão horizontal no fundo do revestimento asfáltico sob o centro do carregamento (Souza e Soares, 2003)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho faz algumas considerações sobre os ensaios de módulo resiliente (MR) e módulo dinâmico ($|E^*|$), comumente usados na caracterização de misturas asfálticas, com base na teoria da viscoelasticidade linear. Enfatiza-se a importância da consideração do

comportamento viscoelástico dos materiais asfálticos, pois uma vez determinadas as propriedades viscoelásticas fundamentais do material, pode-se inferir a resposta deste sob qualquer tipo e forma de sollicitação (Christensen, 1982; Allen e Haisler, 1985; Souza e Soares, 2002).

Assim sendo, determinou-se a resposta de uma mistura em CBUQ para as condições dos ensaios estudados, mostrando que os valores de MR e $|E^*|$ diferem entre si mesmo quando se consideram tempos de carregamento correspondentes. Além disso, ressalta-se que o MR varia tanto com o tempo de carregamento, como com a temperatura na qual o ensaio é realizado, enquanto que E^* e, conseqüentemente, $|E^*|$ variam com a frequência e a temperatura. Portanto, MR e $|E^*|$ não são parâmetros puramente elásticos, dado o desenvolvimento de deformações viscoelásticas em ambos os ensaios. Interpreta-se ainda, com base na teoria da viscoelasticidade linear, o efeito do uso destes parâmetros na análise estrutural elástica de pavimentos asfálticos.

Agradecimentos

À equipe do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, LMP/DET/UFC. Os autores agradecem ainda ao CNPq-Brasil pelas respectivas bolsas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFNOR (1993) *AFNOR-NF-P-98-260-1 – Essais Relatifs aux Chaussées – Mesure des Caractéristiques Rhéologiques des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 2: Détermination du Module Complexe par Flexion Sinusoïdale*. Association Française de Normalisation – AFNOR, França.
- Allen, D. H. e Haisler, W. E. (1985) *Introduction to Aerospace Structural Analysis*. John Wiley & Sons, USA.
- ASTM (1982) ASTM D 4123 - Standard Method of Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. American Society of Testing and Materials, ASTM.
- Berthelot, C. F. e Allen, D. H. (2002) A Method for Performing Accelerated Characterization of the Viscoelastic Constitutive Behavior of Asphaltic Concrete. *Artigo submetido para avaliação do Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*.
- Christensen, R. M. (1982) *Theory of Viscoelasticity* (2ª ed.). Academic, New York.
- Daniel, J. S. e Kim, Y. R. (2002) Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure using a Viscoelastic, Continuum Damage Model. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT*.
- DNER (1994) Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Betuminosas. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 133/94, Brasil.
- Ferry, J. D. (1980) *Viscoelastic Properties of Polymers* (3ª ed.). Wiley, New York.
- Gibson, N. H., Schwartz, C. W., Schapery, R. A. e Witzak, M. W. (2002) Viscoelastic, Viscoplastic, and Damage Modeling of Asphalt Concrete in Unconfined Compression. *TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM*.
- Goodrich, J. L. (1991) Asphaltic Binder Rheology, Asphalt Concrete Rheology and Asphalt Concrete Mix Properties. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT*, v. 60, p. 80-120.

- Hopman, P. C. (1994) VEROAD: A Linear Visco-Elastic Multilayer Program for the Calculation of Stresses, Strains and Displacements in Asphaltic Road Constructions: A Visco-Elastic Multilayer System. *Delft University of Technology*, The Netherlands.
- Huang, Y. H. (1993) *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Kim, Y. R., Little, D. N. e Benson, F. C. (1990) Chemical and Mechanical Evaluation on Healing Mechanism of Asphalt Concrete. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, v. 59, p. 240-275.
- LCPC (1997) *French Design Manual for Pavement Structure - Guide Technique*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Services d'Études Techniques des Routes et Eutoroutes, n° 502 707, França.
- Lee, H. J. e Kim, Y. R. (1998) Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 124, n° 1, p. 32-40.
- Love, A. E. H. (1944) *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity* (4ª ed.). Dover, New York.
- Medina, J. (1997) *Mecânica dos Pavimentos*, 1a. ed., Rio de Janeiro, RJ, COPPE/UFRJ.
- Momm, L. (2001) Comportamento Viscoelástico do Concreto Asfáltico. *Anais da 33ª Reunião Anual de Pavimentação*, ABPV, Florianópolis, p. 471-487.
- Motta, L. M. G. (1991) Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Park, S. W. e Kim, Y. R. (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 de 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.
- Schapery, R. A. (1974) Viscoelastic behavior and Analysis of Composite Materials. *In: Sendekyj, G. P. (eds) Mechanics of Composite Materials*. New York, USA.
- Schapery, R. A. (1989) On the Mechanics of Crack Closing and Bonding in Linear Viscoelastic Media. *International Journal of Fracture* 39, pp. 163-189.
- SHRP (1994) SHRP-A-415 – *Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes*. Strategic Highway Research Program, Washington, D.C., Estados Unidos.
- Soares, J. B. e Souza, F. V. (2002) Verificação do Comportamento Viscoelástico Linear em Misturas Asfálticas. *Anais do 16º Encontro de Asfalto*, IBP, Rio de Janeiro.
- Souza, F. V. e Soares, J. B. (2002) Previsão do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a partir dos Resultados do Ensaio de Creep Estático. *Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Natal, p. 29-41.
- Souza, F. V. e Soares, J. B. (2003) Efeito da Consideração do Comportamento Viscoelástico Linear do Revestimento no Cálculo de Tensões e Deslocamentos em Pavimentos Asfálticos. Artigo submetido ao XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET.
- Spiegel, M.R. (1971) *Transformadas de Laplace*. Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda.
- Taira, C. e Fabbri, G. T. P. (2001) Modelação Viscoelástica de Ensaio de Fluência Estática e Dinâmica de Misturas Asfálticas com Asfaltos Convencional e Modificado por Polímero SBS. *Anais da 33ª Reunião Anual de Pavimentação*, ABPV, Florianópolis, p. 250-265.
- Tonial, I. A. (2001) Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos. Tese de mestrado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Volterra, V. (1959) *Theory of Functionals and of Integral and Integro-differential Equations*, Dover Publications, Inc., New York.
- Yoder, E. J. e Witzczak, M. W. (1975) *Principles of Pavement Design* (2ª ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Endereço dos autores:

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia – Campus do Pici, S/ N°
 Departamento de Engenharia de Transportes, DET Bloco: 703 CEP: 60.455-760
 Fortaleza - Ceará - Brasil
 e-mail: jsoares@det.ufc.br; flaviovs@terra.com.br