



39.^a RAPV/13.^o ENACOR

Recife/PE - BRASIL - 16 a 19 de setembro 2008

METODOLOGIA SIMPLIFICADA DE ANÁLISE NUMÉRICA DINÂMICA VISCOELÁSTICA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

*Henrique Nogueira Silva¹; Pedro Cavalcanti de Sousa²;
Pedro Custódio de Araújo Jr.³; Jorge Barbosa Soares⁴ & Áurea Silva de Holanda⁵*

RESUMO

A análise mecânico-computacional possibilita uma modelagem mais realista dos parâmetros de projeto de pavimentos asfálticos, podendo resultar em um dimensionamento mais racional desta estrutura. No entanto, a maior acurácia destes parâmetros exige uma descrição mais adequada do comportamento constitutivo dos materiais de pavimentação, bem como a consideração do efeito dinâmico, forças inerciais induzidas pelo carregamento. Este trabalho apresenta uma metodologia simplificada para realização de uma análise viscoelástica da mistura asfáltica com a consideração do efeito dinâmico do carregamento. A análise numérica é realizada em um programa baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). As etapas metodológicas definidas foram: (i) obtenção laboratorial da compliância dinâmica de uma mistura asfáltica do tipo concreto asfáltico, (ii) interconversão da compliância dinâmica para o módulo de relaxação (*input* mais adequado para MEF) e (iii) análise numérica viscoelástica pelo MEF considerando os efeitos dinâmicos de um pulso de carregamento. Com o intuito de ilustrar a metodologia proposta, é mostrado um exemplo de análise dinâmica viscoelástica de um pavimento típico, evidenciando a diferença nos resultados das tensões e deslocamentos quando comparados com uma análise elástica e estática clássica. Espera-se que este trabalho incentive o emprego de análise numérica mais realista para pavimentos asfálticos e contribua para o avanço da caracterização viscoelástica de misturas asfálticas brasileiras, resultando em parâmetros de projeto mais próximos da realidade.

PALAVRAS-CHAVE: Misturas Asfálticas, Viscoelasticidade, Interconversão, Análise Dinâmica.

ABSTRACT

The computational-mechanical analysis allows a more realistic modeling of pavements, which may result in a more reasonable design. However, in order to have increased accuracy in the analysis, a more adequate constitutive behavior of pavement materials must be taken into consideration, as well as dynamic effects, inertial forces from loading. This work presents a simplified methodology for viscoelastic analysis of asphalt mixtures considering the dynamic effect due to the load. The numerical analysis is done with a Finite Element Method (FEM) based software. The steps of the methodology are defined as: (i) laboratory test on hot mix asphalt in order to obtain the dynamic compliance of a HMA, (ii) interconversion from dynamic compliance to relaxation modulus (which is a more adequate input for FEM) and (iii) viscoelastic numerical analysis using FEM taking into consideration the dynamic effects of a load pulse. In order to illustrate the proposed methodology, a viscoelastic dynamic analysis example of a standard pavement is shown and compared to the traditional elastic-static analysis, which illustrates the difference between the two methods. We hope the present work can motivate the use of a more advanced analysis of asphalt pavements and that it can contribute to the viscoelastic characterization of Brazilian asphalt mixtures, resulting in more realistic pavement design parameters.

KEY WORDS: Asphalt Mix, Viscoelasticity, Interconversion, Dynamic Analysis.

¹ Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes – PETRAN - UFC – e-mail: henriquensilva@gmail.com

² Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes – PETRAN - UFC – e-mail: pedrosousa@det.ufc.br

³ Universidade Federal do Ceará – Graduação em Engenharia Civil - UFC – e-mail: pedrojr2005@hotmail.com

⁴ PhD Texas A&M – professor do PETRAN - UFC – e-mail: jsoares@det.com.br

⁵ DSc Engenharia Civil - PUC-Rio – professora do PETRAN - UFC – e-mail: aurea@det.ufc.br



INTRODUÇÃO

Modernamente, no estudo e projeto de pavimentos asfálticos tem-se buscado meios mais efetivos de se analisar a propagação e a magnitude das tensões e deformações exercidas sobre as camadas do pavimento. Estes meios envolvem teorias já bem consolidadas que possibilitam uma determinação precisa dos esforços no corpo estradal e permitem, assim, um dimensionamento mais racional. Tradicionalmente a análise de tensões e deformações em pavimentos tem sido baseada em modelos de comportamento elásticos dos materiais. Embora modelos elásticos lineares sejam mais comumente usados, modelos mais avançados como os elásticos não-lineares vêm tendo seu uso ampliado no país (Medina e Motta, 2005).

O avanço da análise estrutural dos pavimentos passa por um avanço nos programas computacionais de análise disponíveis. Embora as teorias mais avançadas de plasticidade e viscoelasticidade sejam muito bem estabelecidas no campo da mecânica dos materiais, o uso operacional das mesmas para estruturas diversas passa pela disponibilidade de pacotes comerciais nem sempre ao alcance, em particular do meio técnico. Especificamente no caso de pavimentos, há alguns softwares com modelos avançados embutidos (Huang, 2004), mas o uso destes no Brasil ainda é bastante insipiente e restrito ao meio acadêmico. A difusão destas análises avançadas passará não apenas por pacotes computacionais amigáveis, mas também pela adequada caracterização dos materiais, fornecendo, assim, parâmetros de entrada realistas para estes pacotes. A facilitação desta caracterização por meio de ensaios simples e facilmente disponíveis aos laboratórios também é fundamental para a implementação de análises avançadas.

No caso específico da análise viscoelástica, já discutida em alguns trabalhos no Brasil (Souza, 2005; Evangelista Jr., 2006), esta é função direta da disponibilidade de equipamentos hidráulicos de carga repetida para os grupos de pavimentação. Hoje, os equipamentos pneumáticos já são realidade para universidades e alguns órgãos rodoviários. Já os equipamentos hidráulicos, capazes de pulsos de carga com frequências e formas bem definidas, ainda estão sendo implantados nos grupos de pavimentação. Embora existam formas de determinação de propriedades viscoelásticas de misturas asfálticas a partir até de ensaios estáticos (Medeiros Jr., 2006), os equipamentos hidráulicos representam uma grande economia de tempo na realização de ensaios e, conseqüentemente, na determinação de propriedades viscoelásticas como é demonstrado no presente trabalho.

METODOLOGIA DE ANÁLISE DINÂMICA VISCOELÁSTICA DE PAVIMENTOS

Para uma análise mais realista das tensões e deformações em um pavimento asfáltico é sugerida a metodologia descrita no fluxograma da Figura 1. Nos itens subseqüentes serão explicadas as etapas propostas nesta metodologia simplificada.

Caracterização Viscoelástica da Mistura Asfáltica no Domínio da Frequência

Para a análise de tensões e deformações pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), como se pode verificar no item 01 da Figura 1, deve-se inicialmente caracterizar o comportamento constitutivo viscoelástico da mistura asfáltica. A literatura tem consagrado o comportamento viscoelástico linear como representativo das misturas (Schapery, 1982; Souza *et al.*, 2003; Sousa e Soares, 2007). Na seqüência descrevem-se sucintamente os possíveis módulos empregados para a caracterização viscoelástica da mistura. A determinação de cada uma dessas propriedades é feita através de ensaios específicos, cujos parâmetros de teste variam entre solicitações cíclicas ou estáticas e com controle de tensão ou deformação.

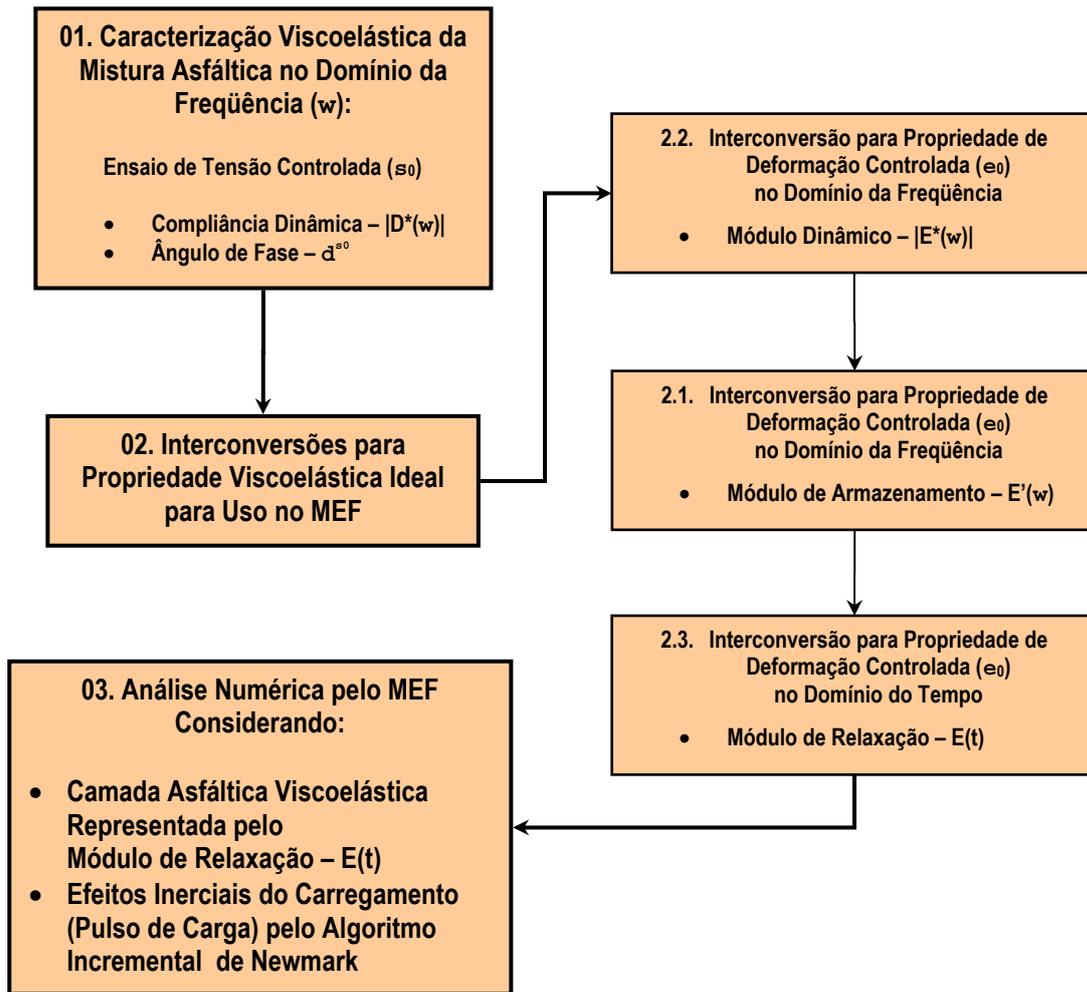


Figura 1. Metodologia de análise dinâmica viscoelástica de pavimentos

O módulo de rigidez permite a obtenção dos valores de tensão (σ) para deformações impostas (ε). Para materiais viscoelásticos, a rigidez é chamada de módulo de relaxação quando as deformações são constantes em relação ao tempo t , $\varepsilon(t) = \varepsilon_0$, e as tensões continuamente decrescentes são medidas ao longo do tempo, $\sigma(t)$. A razão $\sigma(t)/\varepsilon_0$ é definida como módulo de relaxação e é representada por $E(t)$ (Christensen, 1982). Inversamente, quando se deseja obter a deformação a partir dos valores de tensão aplicada, passa-se à noção de flexibilidade. Ao aplicarmos uma tensão constante em um material viscoelástico, $\sigma(t) = \sigma_0$, e medirmos as deformações continuamente crescentes ao longo do tempo, $\varepsilon(t)$, obteremos a função fluência (compliância) $D(t)$, definida como a razão $\varepsilon(t)/\sigma_0$.

Para deformações que sofrem variações periódicas no tempo, passa-se a trabalhar com o módulo complexo, comumente referido por $E^*(\omega)$, onde ω é a pulsação ($\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência do ensaio expressa em ciclos por segundo). Para o caso de variações periódicas de tensões, tem-se a compliância complexa, $D^*(\omega)$ (Schapery, 1982; Momm, 2001; Olard, 2003). Por ser este o módulo escolhido para ensaio segue uma explicação mais detalhada sobre esta propriedade viscoelástica.

Compliância Complexa: Ensaio de Tensão Controlada no Domínio da Frequência

Para a metodologia proposta neste trabalho, optou-se pela execução de um ensaio no domínio da frequência e com tensão controlada, ou seja, compliância complexa, $D^*(\omega)$. Neste caso, aplica-se uma carga (tensão) solicitante harmônica (*input*) dada pela equação 1 e esquematicamente representada pela curva tracejada da Figura 2.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t) \quad (1)$$

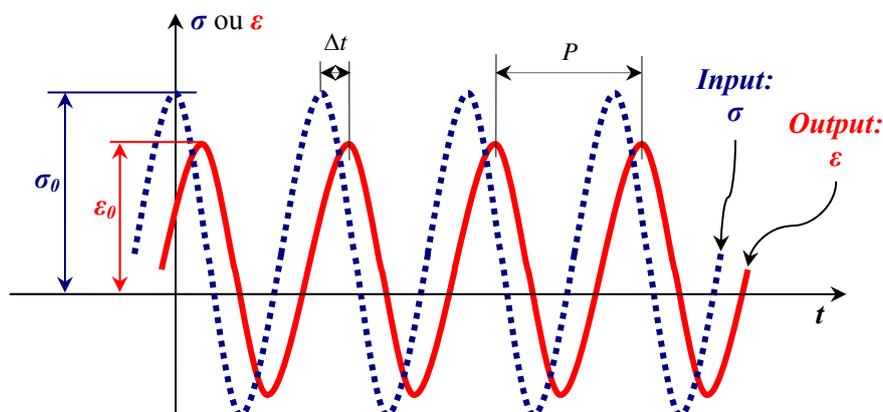


Figura 2. Tensão harmônica aplicada e deformação resultante

Como resultado dessa tensão harmônica aplicada, após o regime permanente ter sido atingido (Findley *et al.*, 1989), as deformações resultantes são medidas (*output*) e apresentam comportamento descrito pela equação 2. Este comportamento está representado na curva contínua da Figura 2.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t - \delta) \quad (2)$$

Onde δ é o ângulo de fase. Este ângulo expressa a relação entre a parcela viscosa e a parcela elástica da mistura asfáltica, e quanto mais próximo de 90° ($\pi/2$ rad) mais viscosa é a mistura. O ângulo de fase está relacionado com o retardo na resposta (Δt) observado experimentalmente e a expressão que relaciona estas grandezas é dada pela equação (3) a seguir, onde P é o período do carregamento harmônico.

$$\delta = \frac{2\pi \cdot \Delta t}{P} \quad (3)$$

Ademais, Lakes (1998) mostra que a relação entre o pico de tensão (σ_0) e o pico de deformação (ε_0) para uma determinada frequência pode ser dada pela equação (4), onde $|D^*(\omega)|$ é um módulo conhecido por compliância dinâmica.

$$|D^*(\omega)| = \left| \frac{\varepsilon(t)}{\sigma(t)} \right| = \frac{\varepsilon_0}{\sigma_0} \quad (4)$$

Resumindo, o ensaio de compliância complexa consiste numa carga harmônica com controle de tensão, σ_0 conhecido, medindo-se para diferentes frequências de solicitação duas propriedades viscoelásticas: compliância dinâmica $|D^*(\omega)|$ definida pela equação (4) e ângulo de fase δ definido pela equação (3). Alternativamente, pode-se representar os resultados deste ensaio por outros dois módulos, $D'(\omega)$, denominado o módulo de armazenamento, e $D''(\omega)$, denominado o módulo de perda, sendo estes relacionados com o módulo dinâmico e ângulo de fase da seguinte maneira.

$$\begin{aligned} D' &= |D^*(\omega)| \cdot \cos(\delta) \\ D'' &= |D^*(\omega)| \cdot \sin(\delta) \end{aligned} \quad (5)$$

Vale ressaltar que a função compliância foi escolhida por se tratar de um ensaio de tensão controlada, sendo, portanto, de mais fácil execução em equipamentos servo-hidráulicos. Com relação ao emprego do ensaio cíclico harmônico, resultando em uma propriedade viscoelástica no domínio da frequência, destaca-se que:

- Este ensaio é de mais curta duração que ensaios realizados no domínio do tempo, uma vez que se pode realizar uma ampla varredura de frequência para uma temperatura fixada, evitando assim, a necessidade de execução de ensaios no domínio do tempo em diferentes temperaturas, que resultaria em ensaios bastante demorados devido ao processo de estabilização da temperatura.

Interconversões para Propriedade Viscoelástica Ideal para MEF

Conforme visto no item 02 da metodologia proposta (Figura 1), para análise numérica de pavimentos pelo MEF é necessário que se tenha como parâmetro de entrada uma expressão para o módulo de relaxação $E(t)$. Esta função pode ser obtida a partir de ensaio de deformação controlada e verificação da tensão resultante, conforme já explicado. No entanto, sendo o ensaio de tensão controlada e carregamento harmônico, ensaio de compliância complexa $D^*(\omega)$, o módulo ideal do ponto de vista experimental, realiza-se este ensaio e seus resultados são interconvertidos para o módulo de relaxação $E(t)$.

A Figura 3 mostra esquematicamente as relações existentes entre as propriedades viscoelásticas, onde as setas indicam relações matemáticas conhecidas que permitem transformar (interconverter) uma propriedade em outra. As propriedades viscoelásticas destacadas em negrito indicam a série de interconversões realizadas segundo os itens 2.1 a 2.3 da metodologia proposta na Figura 1. Partindo da compliância dinâmica $|D^*(\omega)|$ (equação 4), interconverte-se facilmente para o módulo dinâmico $|E^*(\omega)|$ de acordo com a equação seguinte (Findley *et al.*, 1989).

$$|E^*(\omega)| = \frac{1}{|D^*(\omega)|} \quad (6)$$

Esta relação, embora muito simples, requer a hipótese de mesmo ângulo de fase nos ensaios de deformação controlada e de tensão controlada, ou seja, $\delta^{\varepsilon^0} = \delta^{\sigma^0}$. Apesar de acreditar-se ser esta uma hipótese razoável, estudos futuros devem ser realizados a fim de validarem tal hipótese.

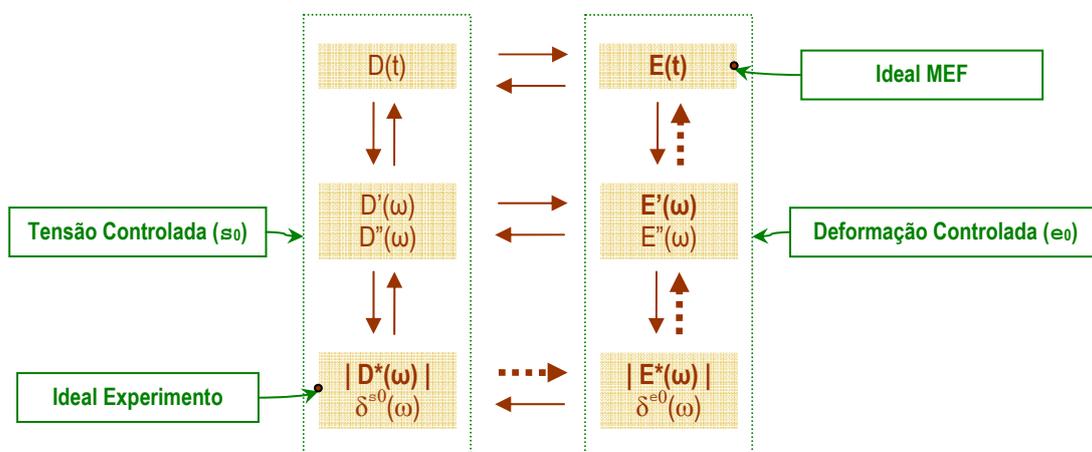


Figura 3. Diagrama de interconversão entre propriedades viscoelásticas

Uma vez obtido o módulo dinâmico $|E^*(\omega)|$ e o respectivo ângulo de fase δ^{ε^0} , deve-se obter o módulo de armazenamento $E'(\omega)$ por meio de uma equação análoga à equação 5. Por fim, deve-se

obter o módulo de relaxação $E(t)$ a partir do módulo de armazenamento. Uma das formas mais simples de realizar esta interconversão é utilizar a equação empírica a seguir fornecida por Christensen (1982).

$$E(t) \cong E'(\omega) \Big|_{\omega \rightarrow (2/\pi t)} \quad (7)$$

Como observado por esta equação, vale ressaltar que o domínio da frequência (ω) e o domínio do tempo (t), embora apresentem uma relação inversamente proporcional, não são valores recíprocos. Para maiores detalhes sobre este tipo de interconversão o leitor é encorajado a consultar o trabalho de Christensen (1982).

Análise Numérica pelo MEF

Uma das principais vantagens do uso do MEF é a capacidade de modelagem constitutiva de materiais mais complexos, típicos de pavimentação, tais como o modelo viscoelástico de misturas asfálticas e o modelo plástico de camadas granulares. Para este trabalho, foi utilizado o programa computacional CAP3D (Holanda *et al.*, 2006), que além de permitir a utilização do modelo constitutivo viscoelástico, possibilita a consideração das forças inerciais induzidas pelo pulso de carregamento. Para maiores detalhes sobre a formulação da análise dinâmica pelo método incremental de Newmark contida no CAP3D o leitor é reportado ao trabalho de Evangelista Jr. (2006). Para fins de elucidação, decidiu-se exibir a relação entre o pulso de carregamento t_p (em segundos) na superfície do pavimento e a velocidade V (em km/h) da carga (equação 8).

$$t_p = 10^{-0,2(1+4,7\log V)} \quad (8)$$

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E EFEITOS EM VARIÁVEIS DE PROJETO

Nesta seção é exibido um exemplo ilustrativo dos passos descritos na metodologia proposta. Para tanto, inicialmente a mistura asfáltica utilizada é caracterizada, os valores do ensaio experimental de compliância dinâmica são exibidos e é mostrada a seqüência de interconversões realizadas até a obtenção do módulo de relaxação. Ao final é realizada a análise dos parâmetros de projeto (tensões e deformações) em uma estrutura de pavimento típica considerando a influência combinada do comportamento viscoelástico da mistura e forças inerciais induzidas devido a um pulso de carregamento que simula a passagem de uma carga.

Caracterização da Mistura

As mistura asfáltica confeccionada foi do tipo concreto asfáltico. O ligante é o Cimento Asfáltico de Petróleo 50/70 produzido pela Lubnor/Petrobras, e os agregados oriundos da Pedreira de Itaitinga distante 30 km da cidade de Fortaleza. Foi realizado o método de dosagem Superpave, que tem como premissa para a escolha do teor de ligante de projeto de um volume de vazios (V_v) igual a 4%. O teor de ligante de projeto encontrado foi de 5,7%. As informações que caracterizam a mistura estão descritas na Tabela 1. Foi realizado ainda o ensaio de Módulo de Resiliência (MR) a fim de se ter um módulo elástico representativo da mistura para posterior comparação com os resultados do módulo de relaxação. O valor encontrado foi $MR = 2982$ MPa (25 °C).

Tabela 1. Parâmetros da dosagem Superpave

Teor de ligante, %	5,7
Volume de vazios, %	3,8
VAM, %	15,8
RBV, %	75,7
Densidade aparente	2,322

Complância Dinâmica e Módulo Dinâmico

Conforme explicado na seção da metodologia proposta, o teste experimental realizado foi o de complância complexa por ser mais prático e de mais simples execução (ensaio de tensão controlada). O procedimento de ensaio foi baseado na norma americana **ASTM D-3497**, com uma carga máxima (σ_0) de 200 kPa, que admite-se ser um nível de tensão compatível com o regime de viscoelasticidade linear. Os resultados obtidos, após a construção da curva mestra, estão exibidos na Figura 4. Após a obtenção dos dados da complância dinâmica $|D^*(\omega)|$, realizou-se a primeira interconversão (procedimento 2.1 da metodologia), o que resultou na obtenção do módulo dinâmico $|E^*(\omega)|$. Como esta interconversão (equação 6) é dada ponto a ponto, obteve-se uma segunda dispersão de pontos, que é também mostrada na Figura 4.

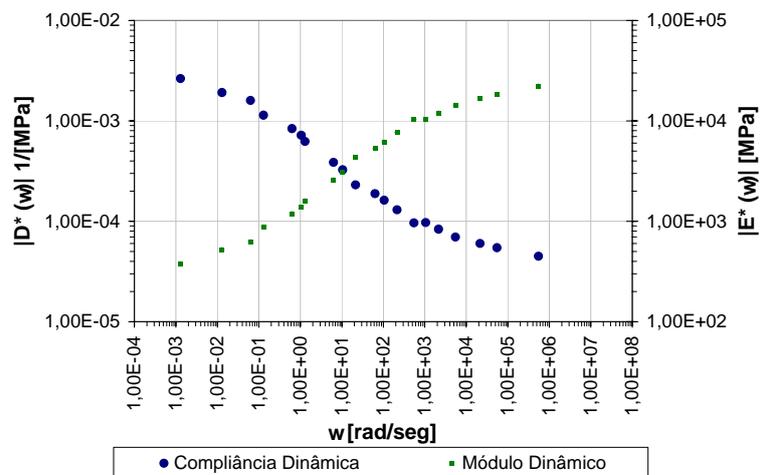


Figura 4. Complância dinâmica e módulo dinâmico

Conhecendo-se os valores do módulo dinâmico $|E^*(\omega)|$ e seu respectivo ângulo de fase (assumido como o mesmo da complância dinâmica), foram determinados facilmente os valores do módulo de armazenamento $E'(\omega)$ (processo 2.2 da metodologia) por relação análoga à primeira das equações 5. Uma vez obtida a dispersão de pontos do módulo de armazenamento, foi realizada uma série de regressões polinomiais das quais se escolheu a regressão polinomial de sexto grau por apresentar o melhor ajuste. Esta curva, assim como os pontos interconvertidos estão apresentados na Figura 5.

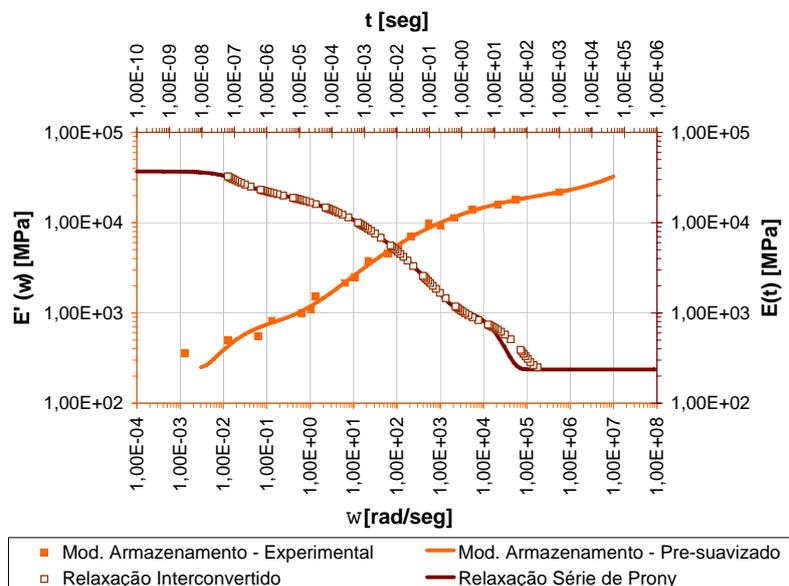


Figura 5. Módulo de armazenamento e módulo de relaxação interconvertido

Deve-se lembrar que a regressão do tipo polinomial é limitada ao domínio de ocorrência dos dados da curva mestra, isto é, extrapolações da faixa de domínio não são confiáveis. Ainda, para o presente caso, o ajuste proporcionado pelo polinômio se revelou adequado, uma vez que os dados experimentais não apresentaram comportamento assintótico muito evidente, não sendo, assim, muito prejudicado pelas oscilações da aproximação polinomial.

Módulo de Relaxação Interconvertido

Uma vez de posse de uma equação que represente o módulo dinâmico de armazenamento, realizou-se a segunda interconversão (processo 2.3 da metodologia), obtendo-se então o gráfico apresentado na Figura 5. Com estes dados gerados, criou-se um arquivo de entrada para o programa *ViscoTool* (Sousa *et al.*, 2008), obtendo-se a curva da série de Prony do módulo de relaxação também exibida na Figura 5.

As oscilações vistas na série de Prony entre as frequências de 1 e 100 Hz são devidas à aproximação polinomial feita em um passo anterior, mas são irrelevantes dado que o objetivo do trabalho não é detalhar processos de interconversão e ajuste de curvas por meio de séries de Prony, mas de análise estrutural de um pavimento asfáltico. Os coeficientes da série de Prony, necessários para uso no programa CAP3D são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Série de Prony do módulo de relaxação interconvertido

Termo	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$	$i = 7$	$i = 8$	$i = 9$
E_i (MPa)	1,23E+04	4,01E+03	3,83E+03	4,60E+03	5,03E+03	3,70E+03	2,13E+03	2,10E+02	8,02E+02
ρ_i (seg)	1,38E-07	1,38E-06	1,38E-05	1,38E-04	1,38E-03	1,38E-02	1,38E-01	1,38E+00	1,38E+01

Termo independente: $E_\infty = 2,36E+02$ MPa

Geometria do Pavimento, Propriedades Elásticas das Camadas Inferiores e Pulso de Carga

Antes de avaliar os resultados para os valores dos parâmetros de projeto, faz-se necessária uma breve descrição das variáveis relativas ao processo numérico utilizado. Na Figura 6 tem-se o modelo axissimétrico adotado para processamento no CAP3D (Evangelista Jr., 2006). As dimensões empregadas foram: distância radial em relação ao carregamento de 2,16 m e profundidade total de 4,31 m. Estas dimensões são baseadas nas recomendações de Duncan *et al.* (1968). Para discretização deste domínio foram utilizados 1800 elementos quadráticos de 8 nós.

Na modelagem por Elementos Finitos foram utilizadas 4 camadas, que representam uma estrutura típica: revestimento asfáltico de 5 cm de espessura, base de 15 cm de espessura, sub-base de 20 cm de espessura e subleito. A Tabela 3 exhibe as propriedades elásticas das camadas inferiores (base, sub-base e subleito) e respectivos valores das massas específicas para a consideração dos efeitos inerciais (dinâmicos) induzidas pelo pulso de carga. Estes valores típicos foram extraídos de Soares *et al.* (2000).

Tabela 3. Propriedades elásticas e densidade das camadas inferiores

Camada	Módulo Elástico E (MPa)	Coef. Poisson ν	Densidade ρ (kg/m ³)
Base	300	0,35	2.050
Sub-base	200	0,35	1.900
Subleito	100	0,35	1.700

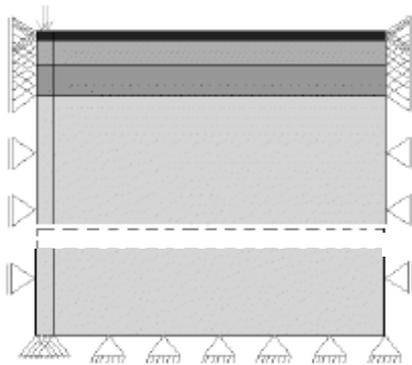


Figura 6. Modelo axissimétrico e condições de contorno

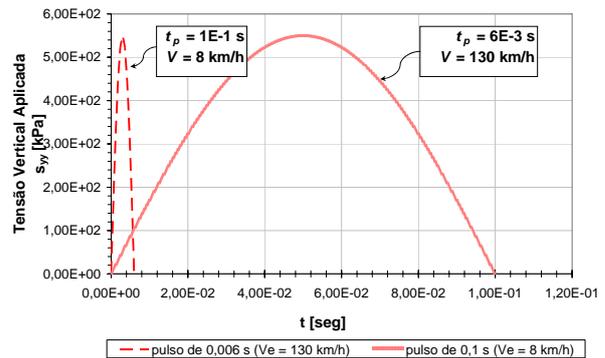


Figura 7. Duração do pulso e velocidade equivalente

Com relação ao carregamento, foi considerada uma carga de 20,5 kN (1/4 da carga total do eixo padrão) que corresponde a uma tensão vertical de carregamento de 550 kPa. Para simulação do efeito dinâmico foram consideradas duas velocidades de passagem da carga, tomando-se dois valores extremos de modo a verificar o efeito na resposta com maior clareza. A primeira velocidade considerada foi $V = 130$ km/h, representando uma velocidade representativa dos carregamentos em um pavimento de via não-urbana (altas velocidades) e a segunda velocidade considerada foi $V = 8$ km/h, correspondendo a um pavimento de via urbana (baixas velocidades). Aplicando estas velocidades na equação (8) foram obtidos os pulsos de carga equivalentes. A representação gráfica destes pulsos de carga está indicada no gráfico da Figura 7, bem como a respectiva velocidade de carregamento.

Influência da Análise Dinâmica Viscoelástica nas Variáveis de Projeto

Finalizando o exemplo ilustrativo da metodologia simplificada proposta, são gerados os resultados da análise pelo MEF considerando o comportamento constitutivo da camada asfáltica de revestimento representada pela série de Prony do módulo de relaxação indicada na Tabela 2. As forças inerciais foram consideradas pelo pulso de carga, sendo denominada análise dinâmica. Para fins de comparação, foram também gerados outros resultados considerando comportamento constitutivo elástico linear da camada asfáltica, representado pelo módulo de resiliência indicado na seção “Caracterização da Mistura”. Ainda para investigação, foram gerados resultados negligenciando as forças inerciais (análise quase-estática) pela desconsideração da massa específica das camadas do pavimento. Combinando as possibilidades, foram gerados resultados nas seguintes condições: (i) análise viscoelástica dinâmica, (ii) análise viscoelástica quase-estática, (iii) análise elástica dinâmica e (iv) análise elástica quase-estática. Este último corresponde à análise comumente realizada no dimensionamento mecânico de pavimentos no país, sendo também denominado neste trabalho por análise elástica quase-estática clássica. Os parâmetros de projeto considerados foram: (a) deslocamento vertical na superfície da camada de revestimento (d_v), (b) tensão horizontal no fundo da camada de revestimento (σ_{xx}) e (c) tensão vertical no topo do subleito (σ_{yy}).

Analisando o gráfico indicado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, verifica-se uma redução no deslocamento vertical (d_v) quando considerado o modelo viscoelástico dinâmico com uma velocidade do carregamento de 130 km/h, indicando que a análise elástica quase-estática clássica está a favor da segurança para este parâmetro. Nesta análise clássica, assumindo a modelagem viscoelástica dinâmica como referência, verifica-se que o pico de deslocamento é majorado por um fator em torno 30%.

Avaliando o parâmetro tensão horizontal (σ_{xx}) para velocidade de 130 km/h (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), verifica-se que a consideração do efeito viscoelástico da mistura

resulta em pico de tensão de tração muito superior àquele resultante da análise elástica quase-estática clássica. Este efeito torna-se ainda de maior magnitude quando considerado o efeito dinâmico do carregamento, muito embora a componente viscoelástica seja mais significativa. Quantitativamente, verifica-se que ao realizar-se uma análise elástica quase-estática clássica, estaremos minorando a tensão horizontal de tração (σ_{xx}) por um fator de aproximadamente 45% (de 2,3MPa para 1MPa). Além do mais, a consideração viscoelástica da mistura induz uma tensão horizontal (σ_{xx}) de compressão após a passagem do pulso de carga. É importante destacar que o fenômeno de tensão horizontal de compressão não é previsto pela análise elástica quase-estática clássica. Para o efeito combinado (viscoelástico mais dinâmico) verifica-se um pico de tensão horizontal de compressão de 0,7MPa, que apresenta a mesma ordem de grandeza do pico de tensão horizontal de tração quando realizada análise clássica. Lembrando que este pulso de carga irá ocorrer inúmeras vezes ao longo da vida útil do pavimento, o efeito cíclico de tensões horizontais de tração e compressão previsto pela análise viscoelástica dinâmica é capaz de explicar o mecanismo de surgimento de trinca por fadiga. Vale destacar ainda que quanto menor a rigidez da camada de base, mais pronunciado será este comportamento.

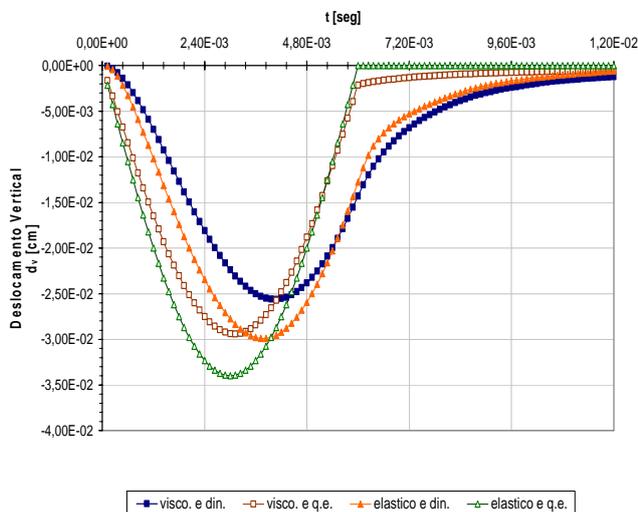


Figura 8. Deslocamento vertical (d_v) no topo do revestimento para pulso $t_p = 0,006$ s ($V = 130$ km/h)

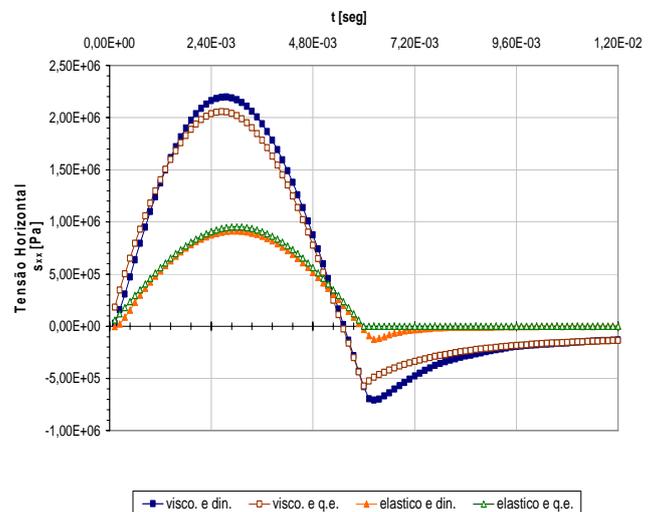


Figura 9. Tensão horizontal (s_{xx}) no fundo do revestimento para pulso $t_p = 0,006$ s ($V = 130$ km/h)

Na Figura 10, tem-se que a tensão vertical no topo do subleito (σ_{yy}) para velocidade de 130 km/h não é fortemente influenciada pelo comportamento viscoelástico da mistura. No entanto, a consideração das forças inerciais resulta em um pequeno aumento (em torno de 15%) no valor deste parâmetro. Este parâmetro, conforme já esperado, apresentou menor sensibilidade à modelagem mais realista (análise viscoelástica dinâmica), uma vez que o efeito no subleito é atenuado pela presença das camadas superiores de sub-base, base e revestimento.

O gráfico da Figura 11 mostra que mesmo para uma velocidade de carregamento baixa ($V = 8$ km/h) o efeito viscoelástico da mistura na tensão horizontal (σ_{xx}) é significativo. O pico de tensão nesta condição é aproximadamente 30% maior que o valor considerando análise elástica quase-estática clássica. Ademais, mesmo para esta baixa velocidade, foi constatada a existência de tensões horizontais de compressão após a passagem do carregamento, indicando que o processo cíclico de compressão e tração, e conseqüente trincamento por fadiga, é significativo, mesmo para baixas velocidades. Avaliando a Figura 9 e Figura 11, verifica-se que o grande responsável por este fenômeno é o comportamento viscoelástico da mistura, justificando, portanto, a necessidade de estudos sobre o comportamento constitutivo viscoelástica da mistura asfáltica. Para os outros dois parâmetros de projeto (d_v e σ_{yy}) e com a velocidade $V = 8$ km/h não foi constatada diferença significativa entre a análise viscoelástica dinâmica e a análise elástica quase-estática clássica.

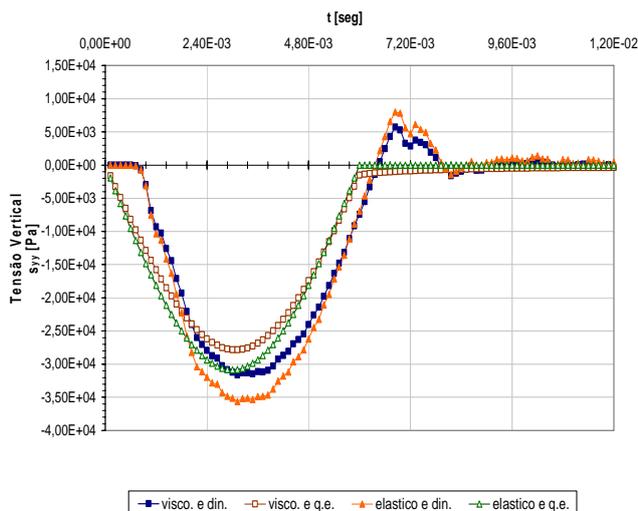


Figura 10. Tensão vertical (s_{yy}) no topo do subleito para pulso $t_p = 0,006$ s ($V = 130$ km/h)

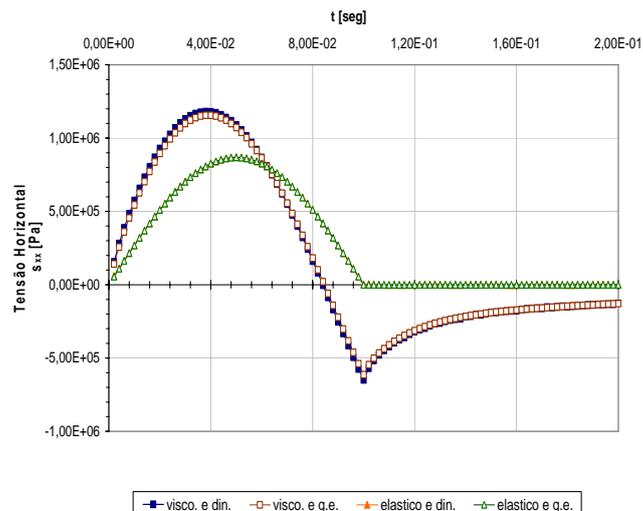


Figura 11. Tensão horizontal (s_{xx}) no fundo do revestimento para pulso $t_p = 0,1$ s ($V = 8$ km/h)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos neste trabalho, verifica-se que o esforço de entendimento, caracterização e interconversão entre propriedades viscoelásticas da mistura são justificáveis pela diferença marcante nas tensões horizontais no fundo da camada asfáltica (σ_{xx}). Para esta variável de projeto, o comportamento constitutivo viscoelástico da camada asfáltica influencia consideravelmente nos valores da tensão horizontal tanto em grandes velocidades (vias não-urbanas) como em baixas velocidades (vias urbanas). Para este parâmetro, quando realizada uma análise elástica clássica, evidencia-se que a tensão horizontal de tração está sendo minorada significativamente e que uma tensão de compressão existente após a passagem do carregamento não é registrada. Estes ciclos de tensão de tração e compressão aceleram o processo de surgimento de trincas de fadiga, justificando, portanto, a necessidade da caracterização viscoelástica de misturas asfálticas.

Para o deslocamento vertical no topo do revestimento (d_v), os efeitos viscoelásticos e dinâmicos reduzem a magnitude deste parâmetro, sendo a análise elástica clássica a favor da segurança. Para a tensão vertical no topo do subleito (σ_{yy}) a consideração do efeito dinâmico do carregamento é mais significativa que a consideração do comportamento viscoelástico da mistura asfáltica, sendo este parâmetro minorado quando realizada uma análise elástica clássica.

Como consideração final deste trabalho, chama-se a atenção de que a modelagem mecânico-computacional aliada com modelos constitutivos mais adequados devem ser encorajados, uma vez que permite a obtenção de parâmetros de projetos mais realistas, contribuindo para o aperfeiçoamento dos projetos de pavimentos asfálticos.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro concedido e a PETROBRAS e FINEP pelo financiamento do projeto em Análise de Pavimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Christensen, R. M. Theory of Viscoelasticity. Academic Press, New York, EUA, 1982.
Duncan, J. M., Monismith, C. L., & Wilson, E. L. Finite element analysis of pavements. Highway Research Record, vol. 228, 1968.
Evangelista Jr., F. Análise Quasi-Estática e Dinâmica de Pavimentos Asfálticos, Dissertação de



- Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.
- Findley, W. N.; Lai, J. S.; Onaran, K. Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials. Dover Publications, Inc. New York, 1989.
- Holanda, A. S.; Parente Jr., E.; Araújo, T. D. P.; Melo, L. T. B.; Evangelista Jr., F. e Soares, J. B. Finite Element Modeling of Flexible Pavements, XXVII CILAMCE, Belém, Brasil, 2006.
- Huang, Y. H. Pavement Analysis and Design. Ed. Prentice Hall, New Jersey, EUA, (2004).
- Lakes, R. S. Viscoelastic solids. CRC Press LLC, USA, 1998.
- Medeiros Jr., M. S. Estudo de Interconversão entre o Módulo Complexo e a Creep Compliance na Caracterização de Misturas Asfálticas, Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.
- Medina, Jacques de; Motta, L. M. G. Mecânica dos Pavimentos. 2. ed. Rio de Janeiro: Edição dos autores, v. 1., 570 p, 2005.
- Momm, L. Comportamento viscoelástico do concreto asfáltico. Anais da 33a reunião anual de pavimentação, ABPV, Florianópolis, Santa Catarina, p. 223-231, 2001.
- Olard, F. Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses température: relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé. Tese de doutorado. L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, França, 2003.
- Schapery, R. A. Theory of viscoelasticity, Lecture notes, 1982.
- Soares, J. B., Motta, L. M. G., e Benevides, S. A. S., 2000. Dimensionamento mecânico de reforço considerando alternativa de base com revestimento fresado incorporado. Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico, São Paulo, SP, Brasil.
- Sousa, P. C.; Silva, H. N. e Soares, J. B. Prony Series Study for Viscoelastic Characterization of Asphalt Mixtures, 19º Encontro de Asfalto-IBP, Rio de Janeiro, 2008.
- Sousa, P. C. e Soares, J. B. Método da Colocação para Obtenção de Séries de Prony Usadas na Caracterização Viscoelástica de Materiais Asfálticos, Anais do XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, 2007.
- Souza, F. V., Soares, J. B. e Allen, D. H. Repeated Load Creep Test Predictions Using the Theory of Linear Viscoelasticity, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, ICEES, 2003.
- Souza, F. V. Modelo Multi-Escala para Análise Estrutural de Compósitos Viscoelásticos Suscetíveis ao Dano, Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.