

MODELO VISCOELÁSTICO LINEAR SIMPLIFICADO PARA APLICAÇÃO AO ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL COM CARGAS CÍCLICAS

Klaus M. Theisen

Aluno do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Washington P. Núñez

Eduardo Bittencourt

Docentes do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

As normas e protocolos atuais aplicados à extração de propriedades constitutivas de misturas asfálticas do ensaio de compressão diametral com cargas cíclicas não fornecem como dado propriedades aplicáveis a modelos viscoelásticos, restringindo-se apenas a modelos elástico-lineares. O presente trabalho apresenta a aplicação de um modelo viscoelástico linear simplificado para calibração e previsão de resultados do referido ensaio, extraído-se dele propriedades constitutivas viscoelásticas. Uma breve revisão da teoria da viscoelasticidade é mostrada, bem como o procedimento de aquisição dos dados experimentais, o tratamento de dados para entrada no modelo, os métodos de calibração utilizados e a comparação dos resultados do modelo com os dados experimentais, no qual resultados satisfatórios foram obtidos.

ABSTRACT

The current standards and protocols applied to get constitutive properties of asphalt mixes through diametral compression test with cyclic load do not supply properties applicable to viscoelastic models, limiting itself only to linear elastic models. This paper presents a simplified linear viscoelastic model to calibration and prediction of results of the related test, getting constitutive viscoelastic properties of this test. A little review of the viscoelasticity theory is shown, as well as the procedure of experimental data acquisition, the treatment of model input, the model calibration methods and the comparison of results between the model and experimental data, in which satisfactory results was achieved.

1. INTRODUÇÃO

O parâmetro constitutivo mais utilizado em dimensionamento de pavimentos flexíveis é o módulo de resiliência, alvo de muitos estudos na área de pesquisas em misturas asfálticas.

O termo “resiliência” em materiais de pavimentação foi utilizado primeiramente por Hveem (1955), que adotou o termo argumentando que as deformações nos pavimentos são maiores que as dos sólidos elásticos que lida o engenheiro. Na verdade, o termo resiliência significa a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações; corresponde a energia potencial de deformação (Medina, 1997). Em resumo, o módulo de resiliência é um módulo de Elasticidade obtido em condições de carga cíclica, onde são submetidos os materiais de pavimentação em serviço. A teoria da elasticidade é empregada para a obtenção do módulo de resiliência.

Segundo Severi *et al.* (1999), o valor do módulo de resiliência depende da forma de aplicação da carga relativamente ao formato da peça estrutural ou amostra laboratorial estudada. Zhang *et al.* (1997) relatam que para um material viscoelástico, a adoção do módulo de resiliência e do Coeficiente de Poisson como parâmetros constitutivos é conceitualmente incorreta.

Publicações mostram o comportamento viscoelástico de misturas asfálticas. Entre elas, os trabalhos de Falcão e Soares (2002) e de Momm (2001), que justifica tal comportamento pela presença do cimento asfáltico. Segundo Soares e Souza (2002), tal consideração permite uma

caracterização mais adequada da mistura quanto ao comportamento mecânico e conseqüente previsão mais realista do desempenho dos pavimentos em serviço.

Assim, o presente trabalho objetiva descrever e aplicar um modelo viscoelástico linear simplificado a ensaios de compressão diametral de carga cíclica, aproveitando-se do fato deste ensaio ser largamente aplicado no meio acadêmico nacional e internacional, modelando o comportamento tensão/deformação do material com um modelo constitutivo adequado.

2. TEORIA DA VISCOELASTICIDADE LINEAR: UMA BREVE REVISÃO

Segundo Di Benedetto *et al.* (2001), até um certo número de aplicações de carga e um certo nível de deformação no material, é possível empregar um modelo viscoelástico linear para o modelar o comportamento do mesmo. Os limites referidos podem ser vistos na figura 1:

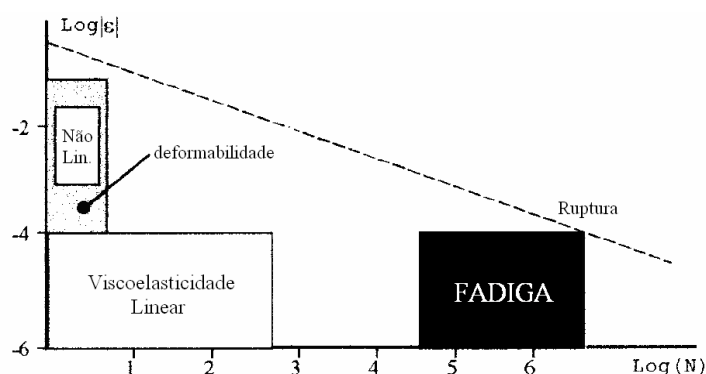


Figura 1: Limites de comportamento das misturas asfálticas (Di Benedetto *et al.*, 2001)

O campo Viscoelástico Linear na figura 1 é atingido com cargas significativamente menores que as limites do material. Com cargas baixas, também é coerente considerar o material como isotrópico (Kim *et al.*, 2004) e com dano inexistente ou desprezível (Gibson *et al.*, 2003).

Os ensaios citados até então buscam impor ao material um comportamento viscoelástico linear. Assim, o modelo constitutivo que descreve o comportamento tensão-deformação dos materiais viscoelásticos lineares é expresso pelas equações 1 e 2:

$$\varepsilon(t) = \int_{\tau_0}^t D(t-\tau) \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (1)$$

$$\sigma(t) = \int_{\tau_0}^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (2)$$

onde: $\varepsilon(t)$: deformação em função do tempo;
 $D(t-\tau)$: curva de fluência ou *creep compliance*;
 $\sigma(t)$: tensão em função do tempo;
 $E(t-\tau)$: curva de relaxação ou *relaxation modulus*;
 τ : instante de início de aplicação de carga;
 τ_0 : instante inicial de aplicação de carga.

Há vários modelos para descrever $D(t-\tau)$ e $E(t-\tau)$ em função do tempo. A forma mais comum em pesquisas sobre misturas asfálticas são as séries de Prony, vistas nas equações 3 e 4:

$$D(t - \tau) = D_0 + \sum_{i=1}^n D_i (1 - e^{-\frac{\tau-t}{\tau_i}}) \quad (3)$$

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

onde: E_∞ : módulo de equilíbrio a longo tempo;
 E_i : rigidez elástica de cada elemento Maxwell;
 ρ_i : tempo de relaxação de cada elemento Maxwell;
 D_0 : compliância inicial ou vítrea;
 D_i : compliância de cada elemento Kelvin;
 τ_i : tempo de retardação de cada elemento Kelvin;
 n : número de elemento Maxwell/Kelvin na série.

Portanto, conhecido comportamento das tensões/deformações ao longo do tempo, é possível obter o comportamento das deformações/tensões com o uso das curvas de fluência/relaxação e das equações 1 e 2. Esta relação direta é aplicável no caso onde o problema é unidimensional e se trabalha diretamente com tensões e deformações, exemplificando-se o ensaio de módulo dinâmico onde a carga é aplicada uniaxialmente.

Caso não se trabalhe diretamente com tensões e deformações, ou a geometria do problema não seja unidimensional, a modelagem do problema em questão deve ser feita através do uso do PRINCÍPIO DA CORRESPONDÊNCIA ELASTO-VISCOELÁSTICA (PCEV).

A relação constitutiva básica dos materiais viscoelásticos lineares é expressa nas equações 1 e 2, distintas da relação constitutiva básica elástica linear. Entretanto, as equações de equilíbrio e as equações de compatibilidade entre deformações e deslocamentos não se alteram com relação à da solução de um problema cujo material é viscoelástico. Assim, a solução de um problema cujo material é viscoelástico linear pode ser obtida a partir da solução do mesmo problema cujo material é elástico linear, aplicando-se o PCEV.

A aplicação do PCEV é simples: consiste na substituição algébrica de parâmetros constitutivos elásticos lineares por parâmetros viscoelásticos lineares na solução do problema. Esta substituição, salvo em casos restritos, não tem sentido se feita no domínio tempo, havendo necessidade de aplicação de Transformada de Laplace para sua execução.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Todos os materiais e equipamentos para obtenção de dados experimentais mostrados neste trabalho se referem ao trabalho de Brito (2006), onde maiores detalhes sobre os materiais e métodos descritos no presente trabalho podem ser vistos.

3.1. Materiais empregados

Utilizou-se para esta pesquisa corpos-de-prova de concreto asfáltico modificado com borracha (via úmida), cujo ligante asfáltico utilizado na mistura foi o Ecoflex B, comercializado pela Greca Asfaltos S.A. O teor de ligante utilizado na mistura foi de 5,6%. Os agregados minerais utilizados, de natureza granítica, provindos da pedreira Sargon (Santa Isabel – SP), têm sua distribuição granulométrica vista na figura 2. A tabela 1 mostra os corpos-de-prova tomados para o presente trabalho:

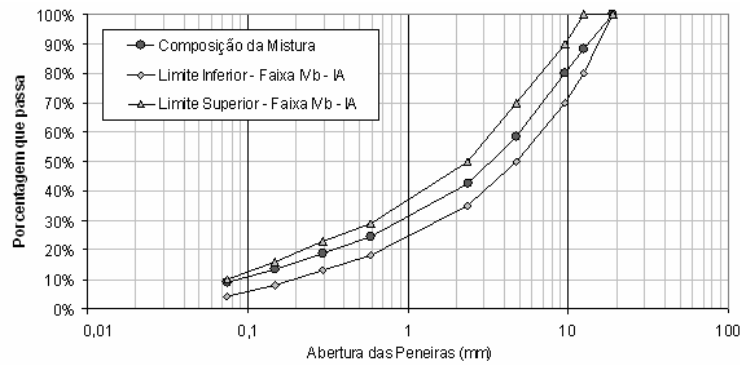


Figura 2: Curva granulométrica da mistura asfáltica utilizadas na pesquisa (Brito, 2006)

Tabela 1: Propriedades dos corpos-de-prova ensaiados (adaptado de Brito, 2006)

Corpo-de-prova	Altura (cm)	Índice de vazios (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
3K	6,31	3,33	3,99	0,71
5I	6,46	4,75		

3.2. Aquisição de dados experimentais

O ensaio consiste na aplicação de uma tensão desvio pulsante através de um cilindro de pressão. A carga gerada pela pressão de ar comprimido liberada pela válvula três vias (solenóide) é medida pela célula de carga e distribuída pelos frisos de carga ao corpo-de-prova. Os deslocamentos são medidos pelos L.V.D.T. (*Linear Variable Displacement Transducer*) preso ao corpo-de-prova por suportes. Amplifica-se o deslocamento com um condicionador de sinais, e estes são armazenados em um sistema de aquisição de dados.

O princípio de aplicação de carga é o mesmo do ensaio de compressão diametral, porém com carregamento pulsante e o corpo-de-prova não rompido. A carga é de magnitude equivalente a um percentual da resistência à tração da mistura, usualmente 15%. Na figura 3(a) e 3(b), são vistos os L.V.D.T.'s acoplados ao corpo-de-prova. Na figura 3(c), é visto o pórtico onde se localiza o corpo-de-prova, bem como o pistão de carga.

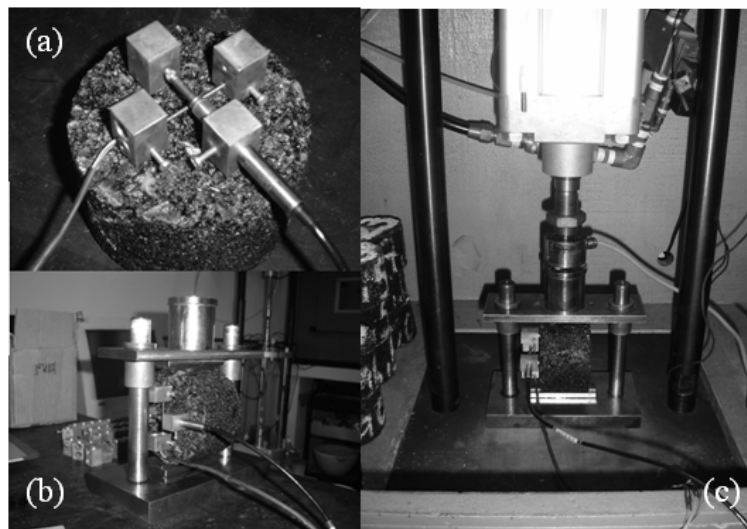


Figura 3: Aplicação de carga e medição de deslocamentos nos corpos-de-prova

4. DESCRIÇÃO DO MODELO E MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO

4.1. Tratamento dos dados de entrada

Os dados experimentais são as leituras da célula de carga e dos deslocamentos durante o ensaio. Cada tipo de dado lido foi tratado de forma diferente, conforme explicação que segue.

Os pulsos de carga receberam eliminação de ruídos e após ajustados com polinômios de quarta ordem, visto na equação 5, obtendo-se bons ajustes ($R > 0,99$).

$$P(t) = \sum_{i=0}^4 c_i t^i \quad (5)$$

Quanto aos deslocamentos, são fornecidos como dados os deslocamentos dos ciclos de carga-descanso 50 a 54, 60 a 64, 70 a 74 e assim por diante (após 50 ciclos de condicionamento). Optou-se por trabalhar com a média destes conjuntos de ciclos, devido aos dados possuírem pouca variação com relação a esta.

A tabela 2 mostra a pouca variabilidade dos dados obtidos com relação a média dos mesmos. Considerou-se na tabela uma variação de $\pm 20\%$ com relação à média.

Tabela 2: Percentagem de dados das envoltórias extrapolantes ao limite de 20%

Conjunto de Dados	% Extrap. Desloc. Horizontal	% Extrap. Desloc. Vertical
Envoltória Inferior	4,08	5,76
Envoltória Superior	3,60	5,84

4.2. Número de elementos Kelvin adotados no modelo

Gibson *et al.* (2003) e Souza (2005) utilizaram de 9 a 12 elementos Kelvin para ajustar curvas de fluência de misturas asfálticas. No caso do ensaio de compressão diametral não são necessários tantos elementos, devido ao tempo de aquisição de dados do sistema utilizado e ao tempo em carga dos corpos-de-prova. Assim, optou-se por adotar no máximo três elementos Kelvin para calibração, uma parcela elástica pura e uma parcela viscosa pura. A adoção destas parcelas é resultado da comparação das condições do ensaio com as recomendações de tempos de retardação do FHWA (1978).

4.3. Formulário do modelo empregado

Devido às evidências de comportamento não isotrópico das misturas do material aqui ensaiado, vistas em Theisen (2006), optou-se por um modelo simplificado, que considera diferentes propriedades nas direções horizontal e vertical. Sua aplicação se dá a um pulso de carga-descanso genérico X, mostrado na figura 4.

As equações do modelo, cuja dedução é detalhada em Theisen (2006), são mostradas a seguir. As com o sub-índice C se referem ao trecho carregado (de tp_{2X-1} a tp_{2X}), e as com sub-índice D ao trecho descarregado (de tp_{2X} a tp_{2X+1}).

$$u_{CH}^X(t) = \frac{D_{0H}}{h} \Omega_{C0}^X + \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_{iH}}{h} \Omega_{Ci}^X + DRVE_{iH}^X \right) + \frac{D_{PH}}{h} \Omega_{CP}^X + DRV_H^X \quad (6)$$

$$u_{CV}^X(t) = \frac{D_{0V}}{h} \Omega_{C0}^X + \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_{iV}}{h} \Omega_{Ci}^X + DRVE_{iV}^X \right) + \frac{D_{PV}}{h} \Omega_{CP}^X + DRV_V^X \quad (7)$$

$$u_{DH}^X(t) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_{iH}}{h} \Omega_{Di}^X \exp\left(\frac{tp_{2X} - t}{T_{iH}}\right) \right) + \frac{D_{PH}}{h} \Omega_{DP}^X \quad (8)$$

$$u_{DV}^X(t) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_{iV}}{h} \Omega_{Di}^X \exp\left(\frac{tp_{2X} - t}{T_{iV}}\right) \right) + \frac{D_{PV}}{h} \Omega_{DP}^X \quad (9)$$

onde u_{CH}^X : Deslocamento horizontal no trecho carregado do ciclo carga-descanso X;
 u_{CV}^X : Deslocamento vertical no trecho carregado do ciclo carga-descanso X;
 u_{DH}^X : Deslocamento horizontal no trecho descarregado do ciclo carga-descanso X;
 u_{DV}^X : Deslocamento vertical no trecho descarregado do ciclo carga-descanso X;
 D_{kH} ($k=0,1,2,...n,P$): Compliâncias de deslocamento no sentido horizontal;
 D_{kV} ($k=0,1,2,...n,P$): Compliâncias de deslocamento no sentido vertical;
 T_{kH} ($k=1,2,...n$): Tempos de retardação dos elementos Kelvin, sentido horizontal;
 T_{kV} ($k=1,2,...n$): Tempos de retardação dos elementos Kelvin, sentido vertical;
 h : altura do corpo-de-prova.

As funções Ω são funções que dependem das constantes c_i dos polinômios de carga ajustados e dos tempos de retardação, para as parcelas viscoelásticas.

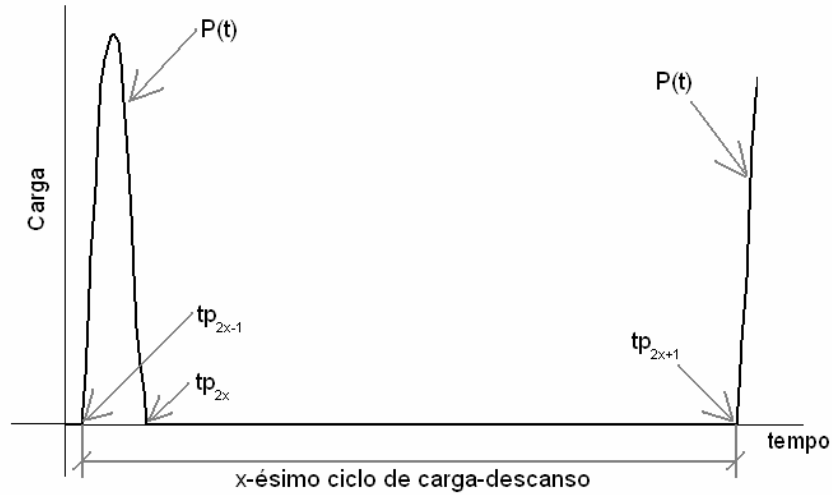


Figura 4: Variáveis do x-ésimo ciclo de carga-descanso

4.4 Métodos de calibração do modelo

Para a calibração do modelo mostrado em 4.3, utilizaram-se dois métodos: um baseado na equação geral dos mínimos quadráticos e outro iterativo quantitativo-qualitativo.

O método baseado na equação geral dos mínimos quadráticos é expresso pela equação 10. Devido às funções Ω serem função dos tempos de retardação, a obtenção das compliâncias D é iterativa. Para cada elemento Kelvin é arbitrado um intervalo de tempos de retardação, onde o algoritmo de resolução interpola valores neste intervalo, sucessivamente diminuindo seu tamanho até a convergência. O método é melhor explicado em Theisen (2006).

O método iterativo quantitativo-qualitativo é o arbítrio das constantes D e T no modelo, buscando-se diminuir o erro quadrático entre a curva teórica e experimental, simultaneamente visualizando-as. Embora seja um método sem velocidade computacional, este se mostrou

bom para o entendimento do comportamento do material frente à variação dos parâmetros. Explicações detalhadas e comparações entre os métodos estão em Theisen (2006).

$$\begin{bmatrix} M_{00} & M_{01} & \dots & M_{0n} & M_{0P} \\ M_{10} & M_{11} & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \\ M_{n0} & \dots & & & \\ M_{P0} & \dots & & M_{PP} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{D_{0HouV}}{h} \\ \frac{D_{1HouV}}{h} \\ \vdots \\ \frac{D_{nHouV}}{h} \\ \frac{D_{PHouV}}{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{0HouV} \\ V_{1HouV} \\ \vdots \\ V_{nHouV} \\ V_{PHouV} \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde

$$M_{ij} = \sum_{X=1}^3 \left[\sum_{t=t_{2X-1}}^{t_{2X}} \Omega_{Ci}^X \Omega_{Cj}^X \right] + \sum_{X=1}^3 \left[\sum_{t=t_{2X}}^{t_{2X+1}} \Omega_{Di}^X \Omega_{Dj}^X \right]; V_{iHouV} = \sum_{X=1}^3 \left[\sum_{t=t_{2X-1}}^{t_{2X}} \Omega_{Ci}^X U_{HouV}^X \right] + \sum_{X=1}^3 \left[\sum_{t=t_{2X}}^{t_{2X+1}} \Omega_{Di}^X U_{HouV}^X \right] \quad (11)$$

e os U^X são os deslocamentos experimentais obtidos, já tratados.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Para cada um dos três corpos-de-prova, a calibração foi feita para os três primeiros ciclos de carga-descanso, obtendo-se as constantes D e T. Para a previsão de resultados, utilizaram-se os dois ciclos seguintes, utilizando as constantes D e T obtidas para tal procedimento.

5.1 Calibrações com um elemento Kelvin

Os resultados obtidos são vistos nas figuras 5 e 6. Mostram-se os resultados para deslocamentos horizontais; os deslocamentos verticais seguiram a mesma tendência.

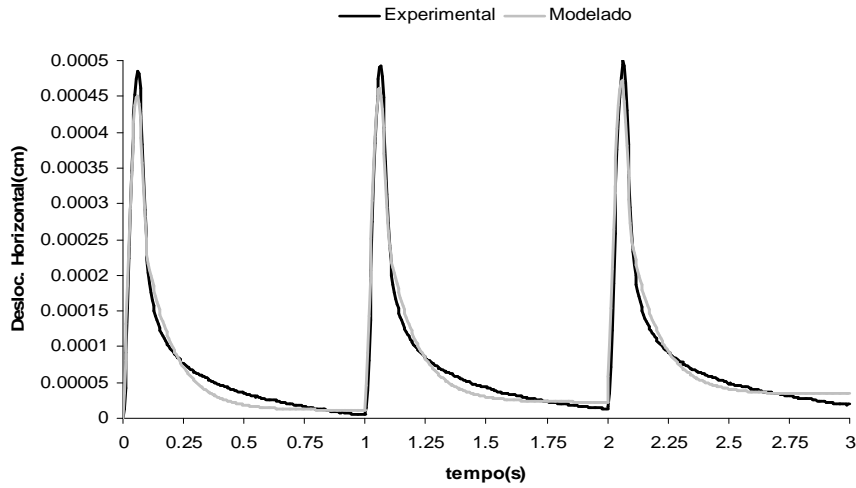


Figura 5: Deslocamentos horizontais para o corpo-de-prova 3K (um elemento Kelvin)

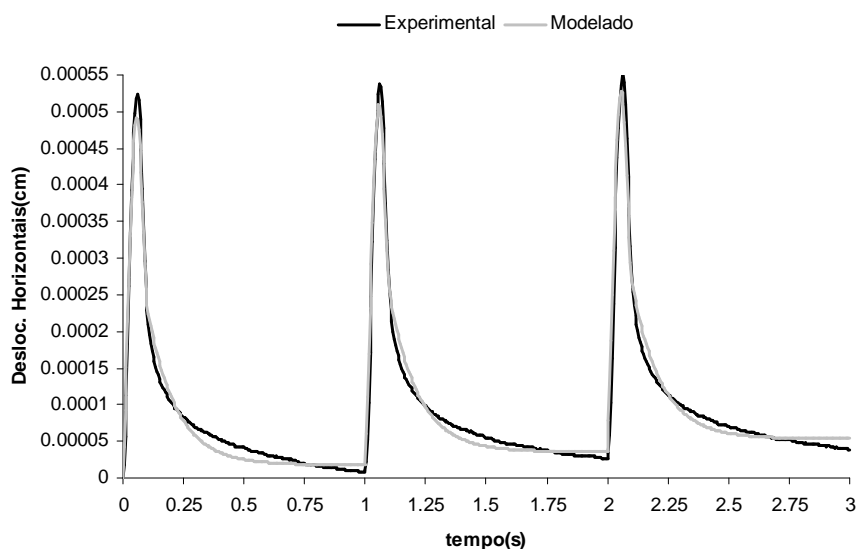


Figura 6: Deslocamentos horizontais para o corpo-de-prova 5I (um elemento Kelvin)

5.2 Calibrações com mais de um elemento Kelvin

Neste item, serão mostrados apenas os resultados para deslocamentos verticais utilizando-se dois elementos Kelvin, isto porque, além dos deslocamentos verticais seguirem a mesma tendência dos horizontais, a diferença entre os ajustes com dois e três elementos Kelvin é muito pequena para ser percebida graficamente, sendo melhor visualizada em tabela. Os resultados obtidos, para dois elementos Kelvin para cada um dos corpos de prova são vistos nas figuras 7 e 8. As simulações com três elementos Kelvin, bem como os resultados para deslocamentos verticais são vistos em Theisen (2006).

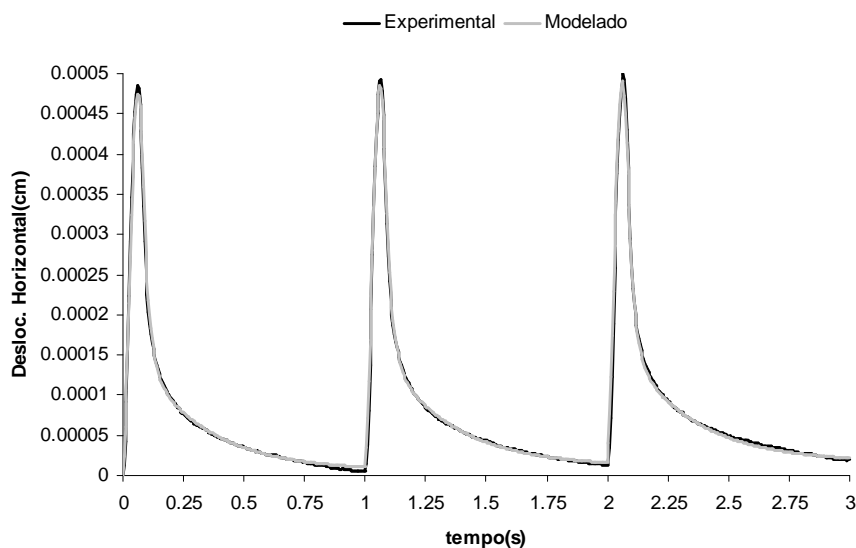


Figura 7: Deslocamentos horizontais para o corpo-de-prova 3K (dois elementos Kelvin)

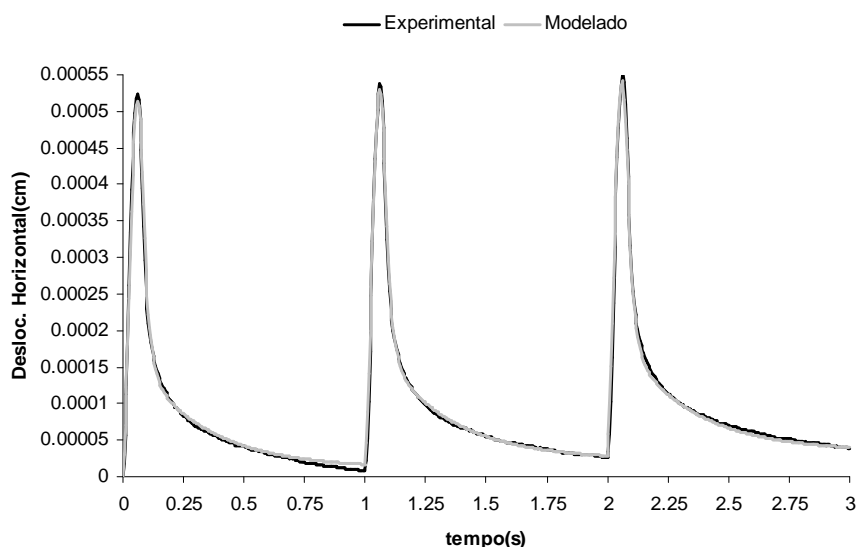


Figura 8: Deslocamentos horizontais para o corpo-de-prova 5I (dois elementos Kelvin)

5.3. Análise dos resultados das calibrações:

O ajuste com 1 elemento Kelvin não foi satisfatório, subestimando o pico de deslocamento e superestimando deslocamentos no final do trecho de descanso, devido à existência de pelo menos dois comportamentos viscoelásticos presentes no material, visto nos ajustes com 2 e 3 elementos Kelvin: um predominante no trecho em carga e outro predominante no trecho em descanso, tal como visto na figura 9 (corpo-de-prova 3K, 2 elementos Kelvin). Nota-se na mesma figura que os deslocamentos nos trechos em carga não são totalmente elásticos, possuindo grande parcela viscoelástica de baixo tempo de retardação. Nos trechos de descanso, há deslocamentos viscoelásticos predominantes com alto tempo de retardação.

Na tabela 4, é visto que a parcela viscosa é proporcional ao índice de vazios dos corpos-de-prova, visto no valor das compliâncias desta parcela. No corpo-de-prova 5I, existe uma parcela viscosa muito significativa com relação aos resultados do corpo-de-prova 3K. Ao supor que a parcela viscosa represente deformações irreversíveis, e sabendo-se que estas são tão maiores quanto maior for o índice de vazios no material, o resultado obtido é coerente.

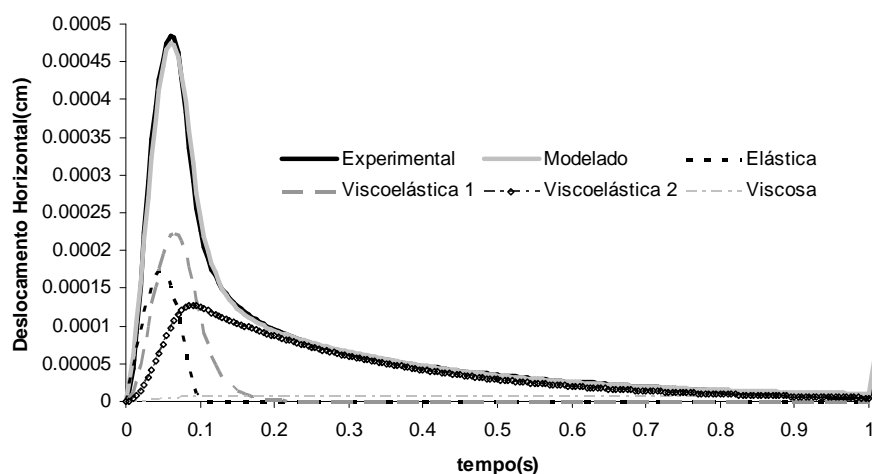


Figura 9: Contribuição de parcelas de deslocamento no modelo proposto

5.4. Previsão dos dois ciclos carga-descanso seguintes

Os erros quadráticos por ciclo das previsões de deslocamentos horizontais são vistos na tabela 3. Nas figuras 10 e 11, são vistas as previsões para os três corpos-de-prova.

Tabela 3: Erros quadráticos por ciclo das previsões

Corpo-de-prova	1 Elemento Kelvin	2 Elementos Kelvin	3 Elementos Kelvin
3K	1,24031E-07	4,28347E-08	4,07863E-08
5I	1,18857E-07	7,23011E-08	7,61467E-08

Das figuras 10 e 11 e da tabela 3, nota-se uma boa concordância entre as curvas experimentais e as modeladas com 2 e 3 elementos Kelvin. A modelagem com um elemento Kelvin apresentou o mesmo problema das calibrações: subestimativa do deslocamento de pico e superestimativa de deslocamentos residuais no fim dos ciclos, o que para previsão de ciclos seguintes ocasionaria progressivo aumento de deslocamentos não reversíveis, obtendo-se deslocamentos tão maiores quanto os experimentais.

Tabela 4: Constantes D e T obtidas na calibração do modelo

Corpo-de-prova	Constante	1 Elemento Kelvin	2 Elementos Kelvin	3 Elementos Kelvin
3K	$D_{0H}(\text{cm}^2/\text{kN})$	6,738E-04	4,150E-04	2,845E-04
	$D_{1H}(\text{cm}^2/\text{kN})$	1,620E-03	6,803E-04	6,578E-04
	$T_{1H}(\text{s})$	0,1186	0,0244	0,0153
	$D_{2H}(\text{cm}^2/\text{kN})$		1,727E-03	8,207E-04
	$T_{2H}(\text{s})$		0,2748	0,1474
	$D_{3H}(\text{cm}^2/\text{kN})$			1,141E-03
	$T_{3H}(\text{s})$			0,412
	$D_{PH}(\text{cm}^2/\text{kNs})$	4,716E-04	2,332E-04	1,968E-04
	$EQ^*(\text{cm}^2)$	1,55209E-07	2,49339E-08	2,09172E-08
	$EQ/\text{ciclo}(\text{cm}^2)$	5,17365E-08	8,31129E-09	6,9724E-09
	$D_{0H}(\text{cm}^2/\text{kN})$	7,689E-04	4,812E-04	3,750E-04
	$D_{1H}(\text{cm}^2/\text{kN})$	1,642E-03	7,018E-04	6,891E-04
5I	$T_{1H}(\text{s})$	0,1183	0,0232	0,0159
	$D_{2H}(\text{cm}^2/\text{kN})$		1,803E-03	9,836E-04
	$T_{2H}(\text{s})$		0,2821	0,1661
	$D_{3H}(\text{cm}^2/\text{kN})$			1,071E-03
	$T_{3H}(\text{s})$			0,4898
	$D_{PH}(\text{cm}^2/\text{kNs})$	7,562E-04	4,872E-04	4,419E-04
	$EQ^*(\text{cm}^2)$	1,5019E-07	2,98035E-08	2,72028E-08
	$EQ/\text{ciclo}(\text{cm}^2)$	5,00634E-08	9,93451E-09	9,0676E-09

*Obs: EQ é o erro quadrático dos dados modelados para os experimentais

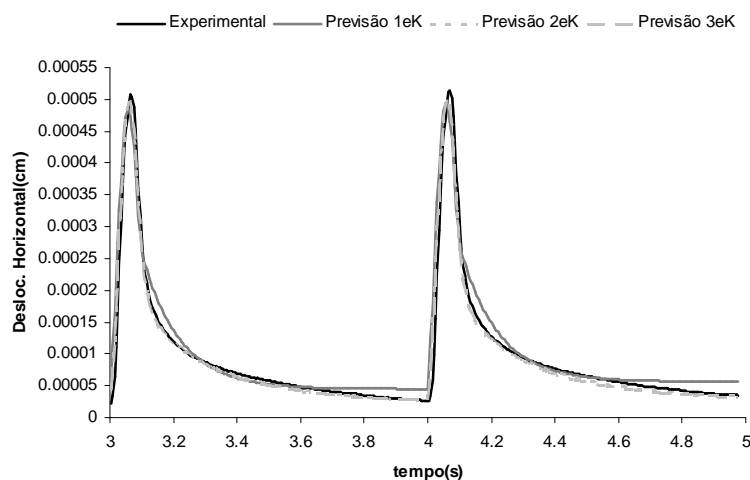


Figura 10: Previsões para os dados do corpo-de-prova 3K

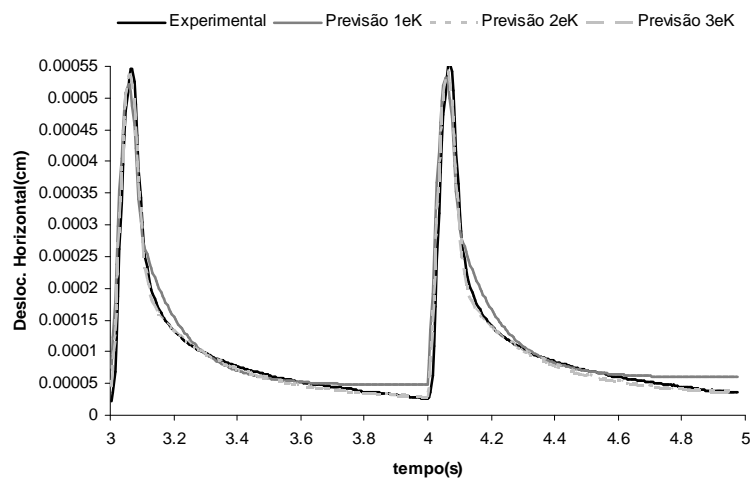


Figura 11: Previsões para os dados do corpo-de-prova 6E

6. CONCLUSÕES

O modelo proposto adequou-se em representar o comportamento das misturas asfálticas, fato visto ao comparar as curvas experimentais com as resultantes das calibrações, notando-se praticante sobreposição de curvas para dois e três elementos Kelvin. Os parâmetros extraídos (constantes D e T), além de representar separadamente as parcelas de deslocamentos do material, fornecendo propriedades elásticas, viscoelásticas e viscosas, são coerentes com relação ao índice de vazios, especialmente ao se tratar de deslocamentos irreversíveis.

Provando que os resultados das calibrações conseguem descrever o comportamento do material após o domínio das calibrações, as previsões dos ciclos carga-descanso restantes dos dados também tiveram curvas teóricas e experimentais semelhantes entre si. Isto permitiria, com ressalvas, uma previsão de mais dados de ensaios.

Em resumo, o modelo proposto neste trabalho fornece propriedades que modelam e prevêm o comportamento carga-deslocamento de misturas asfálticas de forma mais realista que o tradicional módulo de resiliência, ao se tratar do ensaio de compressão diametral de cargas

cíclicas. Desta forma, a sugestão é que se realizem novas pesquisas nesta linha, para que se possa caminhar na busca de que ensaios forneçam parâmetros que consideram o material como viscoelástico para que um dia se faça uso deste em projeto.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao LAPAV-UFRGS, especialmente ao mestrando Lélío Brito, por possibilitar a realização deste trabalho; e ao professor Guillermo Juan Creus, pelo auxílio na parte de viscoelasticidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRITO, L.A.T. (2006) *Avaliação e Análise Paramétrica do Ensaio de Compressão Diametral sob Cargas repetidas em Misturas Asfálticas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 144p.
- DI BENEDETTO, H.; PARTL, M.N.; FRANCKEN L.; DE LA ROCHE, C. (2001) *Stiffness Testing for Bituminous Mixtures*. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, vol.34, p 66-70.
- FALCÃO, M.F.B.; SOARES, J.B. (2002) *Considerações Sobre o Ensaio de Compressão Diametral no Estudo de Materiais de Pavimentação*. Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes (ANPET) – anais, v.1.
- FHWA (1978) FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Report No FHWA-RD-77-154 – Predictive Design Procedures, VESYS Users Manual.
- GIBSON, N.H.; SCHWARTZ, C.W., SCHAPERLY, R.A., WITCZAK, M.W. (2003) *Viscoelastic, Viscoplastic, and Damage Modeling of Asphalt Concrete in Unconfined Compression*. Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting CD-ROM 2003.
- HVEEM, F.N. (1955) *Pavement Deflections and Fatigue Failures*. Bulletin n.114, HRB(TRB), Washington – DC, p.43-87.
- KIM, Y.R.; SEO, Y.; KING, M.; MOMEM, M. (2004) *Dynamic Modulus Testing of Asphalt Concrete in Indirect Tension Mode*. Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting CD-ROM 2004.
- MEDINA, J. (1997) *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro: UFRJ, 380p.
- MOMM, L. (2001) *Comportamento Viscoelástico do Concreto Asfáltico*. Anais da 33ª Reunião Anual de Pavimentação, Florianópolis – SC.
- SEVERI, A.A.; BALBO, J.T.; RODOLFO, M.P.; SESTINI, V.M.; PRIETO, V. (1999) *Verificação a Fadiga de Revestimento e Bases Cimentadas “Programa Pavimentos Asfálticos v.1.0”*. Anais do 3º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço (SINAPPRE), v.3, Belém – PA, p.105-115, ABPv.
- SOARES, J.B.; SOUZA, F.V. (2002) *Verificação do Comportamento Viscoelástico Linear em Misturas Asfálticas*. Anais do 16º Encontro do Asfalto, IBP, Rio de Janeiro – RJ.
- SOUZA, F.V. (2005) *Modelo Multi-Escala para Análise Estrutural de Compósitos Viscoelásticos Sucetíveis a Dano*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, 189p.
- THEISEN, K.M. (2006) *Aplicação do Princípio da Correspondência Elasto-viscoelástica para Previsão de Deformabilidade de Misturas Asfálticas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 150p.
- ZHANG, W.; DRESCHER, A.; NEWCOMB, D.E. (1997) *Viscoelastic Analysis of Diametral Compression of Asphalt Concrete*. ASCE Journal of Engineering Mechanics, v.123, n.6, p. 596-603.

Klaus M. Theisen (theisenkm@yahoo.com.br)

Washington Peres Núñez (wpnunez@cpgec.ufrgs.br)

Eduardo Bittencourt (bittenco@cpgec.ufrgs.br)

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Avenida Osvaldo Aranha, 99 – 3º Andar – Porto Alegre – RS.