

IAG186-01-2013
APLICAÇÃO DE ANÁLOGOS MECÂNICOS PARA REPRESENTAR O
COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO LINEAR DE MISTURAS
ASFÁLTICAS E INTERPRETAR SUA INFLUÊNCIA NO MÓDULO DE
RESILIÊNCIA
APLICACIÓN DE LA MODELIZACIÓN EN TÉRMINOS DE MUELLES Y
AMORTIGUADORES LINEALES Y PARABÓLICOS DEL
COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO LINEAL DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS

Lucas F. de A. L. Babadopulos
Jorge Barbosa Soares
Verônica T. F. Castelo Branco
Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, Brasil
lucsbaba@det.ufc.br, jsoares@det.ufc.br, veronica@det.ufc.br

Flávio Vasconcelos de Souza
PRH-31, ANP
Fortaleza, Brasil
flaviovs@gmail.com

Resumen

Un nuevo método de diseño mecanístico-empírico de firmes está en desarrollo en Brasil y hará uso del parámetro elástico Módulo Resiliente (MR) de las capas para analice estructural. Todavía la literatura internacional ya tiene consolidado el conocimiento acerca del carácter viscoelástico de las mezclas asfálticas. En este artículo, la modelización viscoelástica lineal es usada con objetivo de presentar los efectos de características viscoelásticas lineares en resultados de modelos y experimentales de MR para mezclas brasileñas. Las mezclas ensayadas hacen uso de asfaltos puros y modificados con dos tipos de áridos. Los modelos tienen por base análogos mecánicos con un número finito de molas y amortiguadores lineales (conocidos como Series de Prony). Los ajustes fueran hechos con ensayos de módulo dinámico. Un modelo analítico para obtener MR desde las Series de Prony fue usado para prever el MR modelado. MR obtenido por este método es un 40% superior en media cuando comparado con MR de experimentos. Eso es debido a non linealidades intrínsecas a lo ensayo de MR, imperfecciones en las medidas de los desplazamientos horizontales, tipo de carga (equipo hidráulico o neumático), entre otras razones.

Resumo

Um novo método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos está sendo desenvolvido no Brasil de maneira a considerar o parâmetro elástico Módulo de Resiliência (MR) das camadas para análise estrutural. Porém, a literatura internacional já consolidou o conhecimento acerca do caráter viscoelástico linear das misturas asfálticas. Neste trabalho, aplica-se a modelagem viscoelástica linear com o objetivo de melhor apresentar os efeitos de características viscoelásticas lineares em resultados modelados e experimentais de MR para

misturas brasileiras. As misturas testadas utilizam tanto ligantes asfálticos não modificados quanto com modificadores e dois tipos de agregado. Os modelos utilizados são baseados em análogos mecânicos lineares, sendo associações de um número finito de molas e amortecedores lineares, cuja representação matemática é a família de funções conhecidas como Séries de Prony. Os ajustes de modelo foram realizados utilizando dados obtidos em ensaios de módulo dinâmico. Um método analítico para obtenção do MR a partir das Séries de Prony, encontrado na literatura, foi utilizado para previsão do MR modelado. O MR obtido por este método é cerca de 40% superior ao MR obtido em experimentos. Isso pode se dever principalmente a não linearidades provocadas pelas condições em que o ensaio de MR é realizado, falhas na medição dos deslocamentos horizontais, tipo de carregamento (hidráulico ou pneumático), entre outras razões.

INTRODUÇÃO

Atualmente, o estado da prática do dimensionamento de pavimentos no Brasil se restringe à aplicação de métodos empíricos da década de 1960. Espera-se que a partir de 2016, um novo método de dimensionamento brasileiro de pavimentos esteja disponível para projetistas com base em análises de tensões elásticas realizadas utilizando-se o Módulo de Resiliência (MR) como parâmetro de elasticidade. Desde os anos 1960, porém, já vem se consolidando o conhecimento do caráter viscoelástico de misturas asfálticas. Tensões e deformações estimadas considerando modelos viscoelásticos podem resultar em valores diferindo em percentuais da ordem de 100% em relação à mesma variável estimada considerando elasticidade pura, a depender da velocidade de passagem dos veículos considerada (Silva, 2009). O presente trabalho envolve a caracterização de propriedades viscoelásticas lineares de misturas asfálticas. Visa-se à compreensão da influência das mesmas no parâmetro MR. Os resultados experimentais de MR e de Módulo Dinâmico advêm do trabalho de Onofre (2012) e Coutinho (2012), a partir de misturas asfálticas brasileiras utilizando dois tipos de agregado (basálticos e graníticos) e variados ligantes asfálticos modificados e não modificados. Detalhes sobre a composição (granulometria, propriedades dos agregados, teor e propriedades do ligante, tipos e teores de modificadores) de cada uma das misturas asfálticas estudadas podem ser encontrados em Onofre (2012) e Coutinho (2012) com o mesmo código de mistura utilizado neste trabalho.

REVISÃO DE LITERATURA

Uma das maneiras de se modelar o comportamento mecânico de materiais viscoelásticos lineares é a utilização de funções genéricas ajustadas de maneira a representar resultados experimentais (ajuste de curvas ou *curve fitting*). Dois tipos de curvas são extensivamente utilizados na literatura: expressões matemáticas não baseadas em modelos mecânicos (como as leis de potência ou as funções Sigmoidais) ou aquelas baseadas em análogos mecânicos (conjuntos de molas e amortecedores). Apesar de geralmente curvas não baseadas em modelos mecânicos serem capazes de representar matematicamente dados experimentais, as constantes determinadas usualmente não apresentam significado físico, o que dificulta a interpretação dos resultados. Por isso, análogos mecânicos foram escolhidos para o desenvolvimento do presente trabalho. São constituídos de molas (de constante elástica E) e amortecedores lineares (de constante de viscosidade η). Diferentes configurações desse conjunto resultam em diferentes soluções matemáticas da família de curvas conhecidas como Séries de Prony. O modelo de Maxwell-Wiechert é representado analogicamente por uma associação em paralelo de pares mola-amortecedor ligados em série, enquanto o modelo de Kelvin-Voigt é representado por uma

associação em série de pares mola-amortecedor ligados em paralelo. Uma variável de tempo para cada par viscoelástico é definida como sendo a relação entre a constante de viscosidade de seu amortecedor (η) e a constante de elasticidade de sua mola (E). Para o modelo de Maxwell-Wiechert, a variável de tempo $\rho = \eta/E$ é conhecida como o tempo de relaxação, enquanto para o modelo de Kelvin-Voigt, $\tau = \eta/E$ é conhecido como tempo de retardação (Soares e Souza, 2003).

No domínio do tempo, a Série de Prony resultante do modelo de Maxwell-Wiechert é obtida à deformação constante, dividindo-se a tensão decrescente necessária para manter a dada deformação pelo valor dessa deformação. O fenômeno do decrescimento da tensão é conhecido como relaxação. A propriedade do material, assim como o experimento a ela associado, é conhecida como Módulo de Relaxação $E(t)$ e sua expressão analítica é representada pela Equação 1.

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon} = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i \cdot e^{(-t/\rho_i)} \quad (1)$$

Os parâmetros E_{∞} , E_i e ρ_i definem a Série de Prony de n elementos que é capaz de representar todas as propriedades viscoelásticas lineares do material analisado.

Para o caso de uma solicitação constante de tensão (ensaio conhecido como *Creep* Estático), observa-se o aumento da deformação com o tempo (fenômeno da fluência). A Série de Prony para a Função Fluência (também denominada compliância, *creep compliance* ou complacência) ($D(t)$) é obtida analiticamente para o modelo de Kelvin-Voigt e é representada pela Equação 2.

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} = D_g + \sum_{j=1}^n D_j (1 - e^{-t/\tau_j}) \quad (2)$$

Os parâmetros D_g , D_j e τ_j também definem uma Série de Prony de n elementos que representa as propriedades viscoelásticas lineares do material estudado.

Ambos os modelos representam o comportamento de um mesmo material e são analiticamente interconvertíveis. De acordo com Silva (2009), são necessários de oito a quinze elementos viscoelásticos para se obter um bom ajuste com relação aos resultados experimentais.

Enquanto isso, no domínio da frequência, duas são as principais propriedades viscoelásticas lineares: o Módulo Dinâmico ($|E^*|$) e o Ângulo de Fase (ϕ). O módulo dinâmico é definido como sendo a relação entre a amplitude de tensão e a de deformação obtidas para um carregamento senoidal a uma dada frequência. Para o mesmo carregamento, o ângulo de fase representa o atraso do pulso de deformação com relação ao pulso de tensão. Quanto mais próximo de zero for o atraso, mais o comportamento viscoelástico tende a um comportamento puramente elástico. Quanto mais próximo de 90° ($\pi/2$), mais o comportamento se aproxima ao de um fluido viscoso. A partir dessas duas propriedades, definem-se outras duas, que representam igualmente o comportamento viscoelástico linear do material: o módulo de estocagem (ou de armazenamento) ($E_1 = |E^*| \cos \phi$) e o módulo de perda ($E_2 = |E^*| \sin \phi$). Assim como o módulo de relaxação, essas propriedades podem ser representadas por equações analíticas deduzidas a partir dos análogos mecânicos utilizando os mesmos parâmetros anteriormente obtidos para a Série de Prony (Equação 1). Assumido o modelo de Maxwell-Wiechert para a representação da viscoelasticidade linear, o módulo de estocagem é calculado a partir da Equação 3.

$$E_1 = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i \frac{\omega^2 \rho_i^2}{1 + \omega^2 \rho_i^2} \quad (3)$$

Para a obtenção das constantes das Séries de Prony das misturas estudadas nesse trabalho a partir de dados experimentais, partiu-se da Equação 3 e se elaborou um processo de minimização de quadrados. Dessa maneira, obtém-se a Série de Prony ajustada considerando todos os M pontos experimentais (ω_k, E_k) obtidos para o módulo de estocagem de um determinado material. Partindo-se da Equação 3 (Módulo de Estocagem para o modelo de Maxwell-Wiechert), e assumindo valores pré-estabelecidos para as constantes de tempo, escreve-se a função custo, a minimizar, como sendo o quadrado da diferença entre o ponto experimental e o ponto previsto pelo modelo (Equação 3). Pode-se mostrar que a derivada da função custo em relação às constantes de rigidez leva à Equação 4 quando igualada a zero (condição necessária de otimização). O valor do módulo de longo termo (E_∞) também deve ser preestabelecido, sendo normalmente assumido como o menor valor de rigidez encontrado experimentalmente. O índice j representa as linhas do sistema linear a solucionar e varia de 1 a n (número de termos da Série de Prony). Deve-se observar que esse processo de otimização não incluiu a restrição de se obterem constantes de rigidez positivas, devendo a escolha das constantes de tempo ser feita de maneira que sejam obtidas constantes de rigidez positivas.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^M \left[\left(\frac{\omega_k^2 \rho_i^2}{1 + \omega_k^2 \rho_i^2} \right) \cdot \left(\frac{\omega_k^2 \rho_j^2}{1 + \omega_k^2 \rho_j^2} \right) \cdot E_i \right] = \sum_{k=1}^M \left[(E_k - E_\infty) \cdot \left(\frac{\omega_k^2 \rho_i^2}{1 + \omega_k^2 \rho_i^2} \right) \right] \quad (4)$$

Ensaio de Rigidez

O parâmetro de rigidez mais utilizado no Brasil é o MR, enquanto em outros países se utiliza o Módulo Dinâmico $|E^*|$, ambos descritos a seguir. Para análises envolvendo viscoelasticidade linear, é necessária a utilização do módulo dinâmico.

- Módulo de Resiliência (MR): o ensaio de MR é padronizado no Brasil pelo DNER-ME 133/94, tendo sido este método recentemente revisto pela Comissão de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP) (ABNT NBR 16018:2011). Os deslocamentos considerados são aqueles ditos recuperáveis (resilientes) e estes podem ser bastante diferentes a depender da definição adotada a partir de cada norma. O deslocamento recuperável assume o valor da diferença entre o pico do pulso de deslocamento e o valor de deslocamento dito não recuperável. A definição deste último varia entre as normas. O valor do MR é definido como a relação entre o pico de tensão de tração e a deformação resiliente de tração calculada a partir pulsos de força e de deslocamento e da geometria do ensaio. Deve-se observar, porém, que, durante o pulso de carregamento, desenvolvem-se deformações viscoelásticas que predominam sobre as deformações elásticas e que são parcialmente contabilizadas como deformações elásticas. A interpretação teórica de ensaios de compressão diametral é bastante complexa, pois envolve distribuições de tensão e de deformação não homogêneas e cuja solução é baseada em uma série de hipóteses que não necessariamente são atendidas.

- Módulo Dinâmico ($|E^*|$): desde a década de 1960 o ensaio de módulo dinâmico vem sendo investigado como substituto do ensaio de MR. Ele é definido como a razão entre o pico de tensão e o de deformação, em estado estacionário (permanente), durante um carregamento harmônico. A possibilidade de contabilizar os efeitos da temperatura e do tempo de carregamento nas propriedades dos materiais asfálticos faz com que este parâmetro venha sendo usado

preferencialmente em outros países. A norma norte-americana mais utilizada para a realização do ensaio é a AASHTO TP 62:2003.

Apesar de o MR e o $|E^*|$ consistirem, ambos, de medidas da rigidez de misturas asfálticas, eles não representam as mesmas propriedades. O MR é geralmente obtido para uma única condição de temperatura e de carregamento. Enquanto isso, o módulo dinâmico é avaliado em diferentes frequências e temperaturas, sendo a curva mestra construída e os modelos mecânicos ajustados a ela. A partir dos modelos ajustados, outras propriedades podem ser obtidas a partir de manipulações matemáticas. Além disso, a adoção de modelos constitutivos viscoelásticos permite a obtenção de soluções de deformação para carregamentos de qualquer formato, desde que respeitados os níveis de deformação para os quais a propriedade do material foi obtida. Por esses motivos, costuma-se tratar do módulo dinâmico como sendo um parâmetro mais próximo de uma propriedade fundamental do material.

Utilizar os resultados de módulo dinâmico (uniaxial) para simular o ensaio de MR implica automaticamente a adoção da hipótese de que a rigidez independe do sentido do carregamento (módulo em tração equivalente ao módulo em compressão). Katicha (2007) mostrou que tal hipótese não é verdadeira, sendo as misturas asfálticas materiais bimodulares (módulo em compressão diferente do módulo de tração). O intertravamento dos agregados faz com que o módulo em compressão seja maior do que o módulo em tração. Tal fato fica mais evidente quando a consistência do ligante asfáltico está mais baixa (altas temperaturas e longas durações de carregamento). Katicha (2007) verificou que, para carregamentos de duração abaixo de 10s, a razão entre o módulo em compressão e em tração varia de 1,2 (0,01s de carregamento) a 1,6 (10s de carregamento). Para carregamentos de duração acima de 10s, a razão cresce mais rapidamente, podendo atingir cerca de 15 para carregamentos de 1.000s de duração. O mesmo autor verificou que o MR a uma dada temperatura, obtido com pulso de carregamento de 0,1s de duração e de formato haversine, tem valor próximo ao de $|E^*|$ na mesma temperatura e a uma frequência de $1/0,1s=10Hz$, que equivale a uma pulsação de $\omega=2\pi/0,1s=62,8rad/s$. Araújo Júnior et al. (2009) verificaram experimentalmente a relação entre o MR e o módulo dinâmico obtido a diferentes frequências de carregamento cíclico. Os autores utilizaram expressões empíricas apresentadas na literatura, que relacionam o MR com o $|E^*|$ em frequências relacionadas ao tempo de carregamento do ensaio de MR.

Soares e Souza (2003) obtiveram o MR na direção axial a partir de uma Série de Prony apresentada em Gibson et al. (2003). Theisen et al. (2007) utilizaram a mesma Série de Prony para simulação de ensaios de MR. Estes autores partiram da análise elástica do ensaio de compressão diametral, representada pela Equação 5, conhecida como Equação de Hondros. A mesma foi desenvolvida para um cilindro de material elástico, isotrópico e homogêneo submetido a um carregamento de compressão na direção do seu diâmetro, usando um friso de carga cuja largura guarda razão com respeito ao diâmetro do CP igual a 0,125.

$$\Delta_{2R} = \frac{P}{E \cdot h} (\nu + 0,2699) \quad (5)$$

Nessa equação, Δ_{2R} é o deslocamento entre os extremos horizontais, P é a carga aplicada, E é o módulo de elasticidade do material, h é a espessura do cilindro e ν é o coeficiente de Poisson. A Equação 5 considera o material como elástico linear e é a base para o cálculo do MR (propriedade que ocupa o papel do módulo de elasticidade na equação). Com algumas

simplificações (como a constância do coeficiente de Poisson) e partindo do princípio de correspondência elástico-viscoelástico (PCEV), Theisen et al. (2007) mostraram que a Equação de Hondros para um meio viscoelástico pode ser representada pela Equação 6.

$$\Delta_{2R}(t) = \frac{(v+0,2699)}{h} \int_0^t D(t-u) \cdot \frac{\partial P(u)}{\partial u} du \quad (6)$$

Aproximando o ciclo de carregamento provocado por uma prensa no CP durante o ensaio de MR como sendo constituído por um trecho carregado de $t_p=0,1s$ com uma função haversine de pico igual a P_0 e por um trecho descarregado de $0,9s$ (tempo de ciclo total de $t_c=1s$), e substituindo a função $D(t-u)$ pela Série de Prony que representa a fluência do material, obtém-se uma solução analítica para os pulsos de tensão e de deformação do ensaio de MR. As Equações 7, 8 e 9 foram obtidas por Theisen et al. (2007) seguindo o procedimento acima descrito.

Para $0 \leq t < t_p$:

$$\Delta_{2R}(t) = \frac{P_0}{h} (v + 0,2699) \left\{ \frac{D_0}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi}{t_p} t\right) \right] + \pi \sum_{i=1}^n D_i F_i(t, t_p, \tau_i) \right\} \quad (7)$$

Onde:

$$F_i(t, t_p, \tau_i) = \frac{1}{2\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi}{t_p} t\right) \right] + \frac{2\pi\tau_i^2}{4\pi^2\tau_i^2 + t_p^2} \left[-e^{-\frac{t}{\tau_i}} + \cos\left(\frac{2\pi}{t_p} t\right) - \frac{t_p}{2\pi\tau_i} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{t_p} t\right) \right] \quad (8)$$

Para $t_p \leq t < t_c$:

$$\Delta_{2R}(t) = \sum_{i=1}^n \Delta_{2R_i}(t_p) \cdot e^{-\frac{t_p-t}{\tau_i}} \quad (9)$$

Onde $\Delta_{2R_i}(t_p)$ é o deslocamento referente ao elemento viscoelástico i no fim do trecho carregado ($t = t_p$).

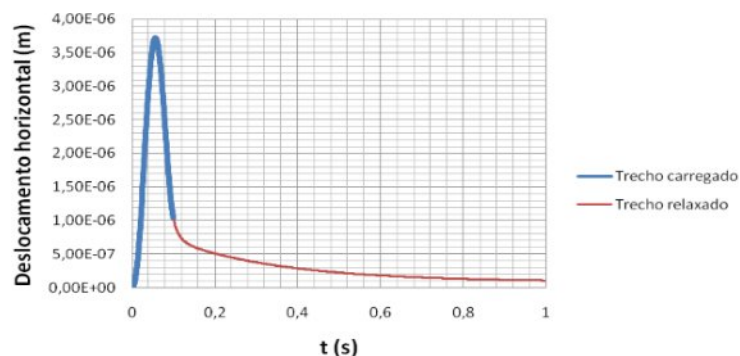
A partir das Equações 7, 8 e 9, pode-se simular o resultado de deslocamento horizontal (no diâmetro máximo) que deveria ser obtido em um ensaio de compressão diametral em material viscoelástico cuja Série de Prony é conhecida, considerando que o mesmo é isotrópico, homogêneo, unimodular e que a Equação de Hondros rege o mesmo problema para um material elástico. De forma aproximada, resultados de MR em compressão diametral correspondentes a uma dada Série de Prony podem ser obtidos. Seguindo as considerações feitas pelas normas citadas anteriormente, em geral, assume-se que o coeficiente de Poisson a $25^\circ C$ é de $0,30$. Isto representa uma grande simplificação, que facilita muito os experimentos, não sendo necessárias medidas de deslocamento além do deslocamento horizontal. Na Figura 1, apresenta-se um exemplo de curva de deslocamento obtida a partir da aplicação das Equações 7, 8 e 9.

Obtida a curva de deslocamento simulada, assim como para uma curva obtida experimentalmente, o MR pode ser calculado a partir da Equação 10.

$$MR = \frac{P}{\Delta_{2R_r} \cdot h} (v + 0,2699) \quad (10)$$

Onde Δ_{2R_r} representa o deslocamento resiliente, segundo definição da norma de ensaio adotada, obtido em um ciclo de carregamento e descanso.

Figura 1. Curva de deslocamento obtido para um carregamento semelhante ao do ensaio de MR a partir da Série de Prony apresentada em Gibson et al. (2003)



É importante a comparação dos valores de MR previstos pela aplicação do modelo viscoelástico linear com valores obtidos experimentalmente, de maneira a verificar a aplicabilidade do MR para as condições de tempo de carregamento e de temperatura em que é testado. Porém, seria mais interessante do ponto de vista prático a obtenção do módulo dinâmico a partir do MR. Alguns estudos desse tipo já foram apresentados na literatura, através da utilização de redes neurais, obtendo resultados promissores. Outros partem da aplicação de modelagem constitutiva viscoelástica linear. Contudo, os bancos de dados existentes não serão capazes de fornecer módulos dinâmicos a diferentes temperaturas e frequências de carregamento obtidos a partir dos dados de MR.

RESULTADOS

Para a comparação entre a resposta elástica de pavimentos e aquela obtida considerando as propriedades viscoelásticas do revestimento, é necessária a adoção de valores de MR que correspondam às Séries de Prony que representam o comportamento dos materiais estudados. Não há garantia de que os valores obtidos experimentalmente para esse parâmetro correspondam à rigidez das misturas (identificada pelas Séries de Prony), devido a diversos fatores discutidos (estado biaxial de tensões, bimodularidade da mistura asfáltica, heterogeneidade, dimensões dos agregados em relação à altura do CP testado, etc). Seria possível utilizar valores de módulo dinâmico a frequências sugeridas na literatura. Sublinha-se, porém, que as relações utilizadas para selecionar a frequência em que se toma o valor de módulo dinâmico para comparação com o MR são de uso prático, mas não representam um cálculo analítico. A teoria da viscoelasticidade linear pode fornecer resultados de análises viscoelásticas, como apresentado para o ensaio de MR, por exemplo. O método analítico (Equações 7, 8 e 9) foi utilizado para a obtenção de valores de MR modelados (MRmod) neste trabalho. As Séries de Prony (originalmente ajustadas a curvas mestras de módulo de estocagem a 21,1°C na prensa hidráulica UTM-25) tiveram suas constantes de tempo transladadas segundo a Lei de Arrhenius, escolhida para representar o princípio da superposição tempo-temperatura, considerando a constante C obtida para cada uma das misturas. Assim, obteve-se a Série de Prony a 25°C (temperatura do ensaio de MR) para cada material, para a simulação dos resultados de MR. O coeficiente de Poisson foi assumido, para todas as misturas asfálticas, como igual a 0,30, mas foi verificado que sua variação não altera o valor de MRmod obtido analiticamente.

A fim de se comparar os resultados modelados com resultados experimentais, foram utilizados os dados de MR disponíveis para 16 misturas. Os resultados experimentais foram obtidos através do ensaio de tração indireta por compressão diametral segundo a DNER ME 133:94. Os resultados do modelo (mod) e do experimento (exp) obtidos estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados de rigidez obtidos experimentalmente e através da aplicação do modelo

Código da Mistura	C (K)	MRmod a 25°C (MPa)	$ E^*(\omega = 10\text{rad/s}) $	$ E^*(\omega = 62,8\text{rad/s}) $	MRmod/ $ E^*(10) $	MRmod/ $ E^*(62,8) $	MRexp a 25°C (MPa)	MRmod/ MRexp
CAP Replan	12.000	10.925	8.109	13.647	1,35	0,80	5.640	1,94
A3	12.000	11.567	9.135	13.949	1,27	0,83	6.930	1,67
EA3	12.000	12.820	10.399	15.088	1,23	0,85	7.280	1,76
B2	12.000	6.449	5.193	7.679	1,24	0,84	6.990	0,92
BA2	12.000	10.474	8.906	11.957	1,18	0,88	7.120	1,47
S3	12.000	9.364	7.452	11.138	1,26	0,84	6.070	1,54
SA1	12.000	8.424	7.004	9.781	1,20	0,86	8.360	1,01
EV2	12.000	10.282	8.842	11.663	1,16	0,88	10.620	0,97
EVA4	12.000	9.954	8.090	11.677	1,23	0,85	9.010	1,10
P4	12.000	10.733	8.933	12.417	1,20	0,86	8.220	1,31
PA2	12.000	14.245	11.890	16.366	1,20	0,87	8.190	1,74
SB3	12.000	8.995	7.267	10.584	1,24	0,85	6.110	1,47
SBA2	12.000	14.547	12.411	16.547	1,17	0,88	8.800	1,65
MAC A	11.000	6.794	4.806	8.429	1,41	0,81	3.698	1,84
MAC B1	13.000	6.418	4.523	8.425	1,42	0,76	3.901	1,65
MAC B2	13.000	6.322	4.676	8.067	1,35	0,78	4.912	1,29

Da Tabela 1, percebe-se que os valores de módulo dinâmico a uma frequência de 10Hz (pulsção de 62,8rad/s) são sempre superiores aos dos resultados modelados de MR, mantendo máximo desvio de 24%, com média de 20% (percentual em relação ao valor de MR). Araújo Júnior et al. (2009) também encontraram resultados sempre superiores de módulo dinâmico usando a expressão $f=1/t$ para o cálculo da frequência quando comparados ao MR. Para as misturas estudadas, essa aproximação leva a uma superestimação do MR. Os valores de módulo dinâmico a 1,59Hz (pulsção de 10rad/s), por sua vez, foram sempre inferiores aos de MR, sendo o maior desvio de 30%, com média de 21% (percentual em relação ao valor de MR). Este último resultado representa uma subestimação de MR. Ressalta-se, mais uma vez, que nenhum dos dois procedimentos de estimativa do MR a partir da tomada de um valor de módulo dinâmico a determinada frequência representa um processo rigoroso para o cálculo do MR.

Comparando-se os resultados modelados (MRmod) com os resultados obtidos experimentalmente (MRexp) na prensa pneumática, nota-se que, em média, o modelo superestima o valor de MR em 41%, tendo-o, para uma das misturas (CAP Replan, com agregados basálticos e CAP não modificado proveniente da refinaria Replan), superestimado em 94%. Essas diferenças podem se dever ao não atendimento das hipóteses simplificadoras do ensaio de MR (pequenas deformações, homogeneidade, isotropia, unimodularidade, tensões e deslocamentos relacionados através da Equação de Hondros para materiais elásticos). Ressalta-se que, no ensaio de MR, normalmente é aplicada uma carga equivalente a 30% da resistência do material ensaiado, de

maneira a obter um deslocamento facilmente medido pelo equipamento. Porém, a hipótese de linearidade para materiais asfálticos é geralmente violada para deformações a partir de cerca de 0,015%. A depender das características do material (resistência à tração e MR) pode-se não atender a essa hipótese no ensaio de MR hoje normatizado. Além disso, parte dos desvios é devida à diferença entre o pulso de carregamento executado por cada equipamento. Araújo Júnior et al. (2009) verificaram experimentalmente a relação entre o MR obtido em equipamento hidráulico e o MR obtido em equipamento pneumático, encontrando uma diferença de 24%. Diferenças da mesma ordem de grandeza foram encontradas por Brito (2006), que também atribuiu o desvio ao formato do pulso de carregamento. A enorme variação de definição de deslocamento resiliente entre as normas existentes pode levar as empresas fabricantes dos equipamentos de ensaio a adotar definições diferentes. Isso pode levar os operadores a compararem valores de MR que não se referem ao mesmo deslocamento resiliente, quando os mesmos são fornecidos por diferentes equipamentos. No presente trabalho, para o cálculo do MR_{mod}, adotou-se que o deslocamento resiliente equivale à diferença entre o pico de deslocamento e o deslocamento não recuperado ao fim do período de descanso de 0,9s. Ademais, o posicionamento dos medidores de deslocamento (LVDTs) nas faces externas do CP tem ainda influência no resultado de MR medido experimentalmente.

Finalmente, calculou-se, para os resultados modelados de MR, a diferença no valor de rigidez obtido considerando a definição do MR instantâneo em relação ao obtido considerando como deformação resiliente aquela que é recuperada ao fim do ciclo de 1s de ensaio (definição adotada para a obtenção de MR_{mod}). Em média, o MR definido como o adotado neste trabalho (MR_{mod}) é cerca de 20% superior ao MR instantâneo definido na maioria das normas vigentes. Os motivos para a definição do MR instantâneo não são claros na literatura, normalmente se alegando que o procedimento é executado de maneira a desconsiderar a deformação viscoelástica decorrente do processo. De acordo com o que apresentaram Soares e Souza (2003), Theisen et al. (2007) e com o que foi obtido no presente trabalho, as deformações viscoelásticas predominam no ensaio de MR. As propriedades dos pares viscoelásticos, e não da mola elástica que é representada pelo módulo de longo termo E_{∞} , comandam o processo de deformação. Sendo assim, a definição do MR instantâneo não parece se basear no argumento de que se consideram apenas deformações elásticas para seu cálculo, pelo menos do ponto de vista da teoria da viscoelasticidade linear.

CONCLUSÕES

No presente trabalho, tratou-se de parâmetros de rigidez utilizados em análises de pavimentos que fundamentam os métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento. Apresentaram-se relações da literatura entre o Módulo de Resiliência (MR) e o Módulo Dinâmico ($|E^*|$). Foram utilizados dados experimentais disponíveis para 16 diferentes misturas asfálticas brasileiras utilizando 2 tipos de agregados e variados ligantes asfálticos com modificadores. A má previsão do MR a partir da modelagem viscoelástica linear baseada em resultados experimentais de $|E^*|$ pode indicar que condições de linearidade e/ou outras hipóteses simplificadoras não estão sendo atendidas durante os ensaios de MR. Isso pode se dever à aplicação de carregamentos que induzem tensões de tração da ordem de 30% da resistência dos materiais testados, enquanto a literatura aponta que a hipótese de linearidade para materiais asfálticos é geralmente violada para deformações a partir de cerca de 0,015%. Considerando este limite de deformação e que a deformação resiliente é de cerca de 80% da deformação total, deve-se limitar a deformação resiliente a 0,009%. Considerando ainda que a carga utilizada no ensaio de MR induz tensões de

tração da ordem de 30% da Resistência à Tração (RT) do material, para valer a hipótese de linearidade, a relação MR/RT para o material testado deve ser de pelo menos 3.333 (adimensional). É importante verificar se a carga de 30% da RT de fato foi aplicada ao CP para que valha tal raciocínio. Levanta-se igualmente o posicionamento dos LVDTs na face externa do CP como um dos responsáveis pela má previsão do MR a partir do $|E^*|$. Deve-se observar que os valores de MRmod correspondem matematicamente à Série de Prony ajustada sobre os módulos de estocagem, para condições de carregamento do ensaio de MR em que não sejam violadas hipóteses simplificadoras. Esses resultados poderiam ter sido obtidos de maneira análoga considerando outras temperaturas e outros tempos de carregamento e de descanso, enquanto que os resultados de MRexp são obtidos apenas para uma única condição de ensaio. A obtenção de MRmod para diferentes temperaturas e carregamentos, a partir de séries de Prony, se apresenta como uma alternativa para permitir a consideração de efeitos como variações de temperatura e na velocidade de passagem de veículos em dimensionamentos baseados em análises elásticas, onde o MR é o parâmetro de elasticidade dos materiais asfálticos.

REFERÊNCIAS

- AASHTO TP 62 (2003) **Standard method of test for determining dynamic modulus of hot mix asphalt (HMA)**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- ABNT NBR 16018:2011 (2011) **Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- Araújo Júnior, P. C.; Ferreira, W. L. G.; Castelo Branco, V. T. F.; Soares, J. B. (2009) **Considerações a respeito dos ensaios de módulo de resiliência e módulo dinâmico**. XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Vitória, Brasil.
- Coutinho, R. P. (2012) **Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, UFC.
- DNER-ME 133 (1994) **Misturas betuminosas – Determinação do módulo de resiliência**, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Gibson, N. H.; Schuartz, C. W.; Schapery, R. A.; Witczak, M. W. (2003) **Viscoelastic, viscoplastic, and damage modeling of asphalt concrete in unconfined compression**. Journal of the Transportation Research Board (TRB), N° 1860, pp. 3-15.
- Katicha, S. W. (2007) **Analysis of hot-mix asphalt (HMA) linear viscoelastic and bimodular properties using uniaxial compression and indirect tension (IDT) tests**. Ph.D. dissertation. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Onofre, F. C. (2012) **Avaliação do efeito da modificação de ligantes asfálticos por ácido polifosfórico e polímeros na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, UFC.
- Silva, H. N. (2009) **Caracterização viscoelástica linear de misturas asfálticas: Operacionalização Computacional e Análise pelo Método dos Elementos Finitos**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, UFC.
- Soares, J.B.; Souza, F.V. (2003) **Considerações sobre módulo resiliente e módulo dinâmico em misturas asfálticas com base na teoria da viscoelasticidade**. XII Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, Quito.
- Theisen, K.M.; Nuñez, W.P.; Bittencourt, E. (2007) **Modelagem do ensaio de módulo dinâmico e de compressão diametral de cargas cíclicas através de curva de fluência e do princípio da correspondência elasto-viscoelástica**. XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET. Rio de Janeiro, Brasil. 2007.