

CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E MÓDULO DINÂMICO

Resumo

O presente artigo tem como proposta um estudo comparativo entre os ensaios de módulo de resiliência e módulo dinâmico. Uma avaliação das recentes considerações encontradas na literatura a respeito dos dois ensaios é realizada. O módulo dinâmico vem sendo usualmente adotado em métodos de dimensionamento mecanístico de pavimentos asfálticos, em particular nos Estados Unidos, mas também em alguns países da Europa, por considerar a natureza viscoelástica das misturas asfálticas. Já o ensaio de módulo de resiliência, apesar de considerar as misturas asfálticas como materiais elásticos, simula a influência do período de repouso entre os pulsos de carga aplicados, e tem sido o parâmetro mais largamente usado no Brasil para a caracterização de misturas. Dados de módulo de resiliência e módulo dinâmico são apresentados neste trabalho com o fim de se verificar a influência do período de repouso. Para serem comparados, estes dados devem ser obtidos para um mesmo tempo de carregamento. Sendo que o módulo de resiliência é comumente obtido para um tempo de carregamento igual a 0,1s e o módulo dinâmico para diversos valores de frequência, formas de conversão entre esses domínios são necessários. Diversas dessas formas encontradas na literatura são aplicadas no presente estudo.

Palavras Chaves: módulo de resiliência, módulo dinâmico, viscoelasticidade, período de repouso.

Abstract

This paper addresses how dynamic and resilient moduli can be compared. Both tests methods were evaluated based on the information available in the current literature. Dynamic modulus for Hot Mixture Asphalt (HMA) is used as an input for flexible pavement mechanistic design methods, especially in the US, but also in Europe because this test method considers HMA viscoelastic nature. In Brazil, it is more common to use the resilient modulus as an input for pavement design methods. Although this test considers HMA as an elastic material, the effect of rest periods can be investigated. Resilient and dynamic modulus tests were performed in this study for the same HMA in order to compare the test results. Both tests were conducted at five temperatures and the results (for the same frequency) were compared. Considering that the relationship between time and frequency, for those tests, is uncertain, different approximation methods were investigated and discussed.

Key-words: resilient modulus, dynamic modulus, viscoelasticity, rest period.

1. INTRODUÇÃO

Um dos fatores contribuintes para a prematura deterioração dos pavimentos asfálticos é a sua dependência dos métodos de dimensionamento empíricos que não correspondem adequadamente à previsão do comportamento dos materiais em campo. O desenvolvimento de métodos mecanísticos para dimensionamento e análise estrutural dos pavimentos tem sido realizado desde meados do século passado (Kerkhoven e Dormon, 1953; Saal e Pell, 1960; Dormon e Metcalf, 1965). O mais recente e significativo esforço nesta área foi a criação do Guia de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos (MEPDG), introduzido pelo *National Cooperative Highway Research Program Project* (NCHRP 1-37A, 2004).

Para a solução de problemas estruturais, por métodos numéricos ou analíticos, é necessário que se defina a geometria do problema, as condições de contorno e as propriedades dos materiais. A rigidez das misturas asfálticas é necessária para se definir o comportamento dos revestimentos asfálticos e afeta as tensões e deformações nas camadas do pavimento (o próprio revestimento, base, subbase e subleito). Pode-se, então, tentar relacionar a resposta estrutural (na forma de tensão, deformação e deflexão) com o comportamento do pavimento no que diz respeito ao desenvolvimento dos defeitos

mais frequentes ao longo de sua vida útil: vida de fadiga e deformação permanente. Nota-se, portanto, como a rigidez característica dos materiais é um parâmetro crítico para a previsão de desempenho, tornando-se, assim, de fundamental importância o desenvolvimento de uma metodologia eficaz para a sua determinação.

Em versões anteriores do guia de dimensionamento da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), as misturas asfálticas eram consideradas como materiais puramente elásticos, sendo caracterizadas por meio do ensaio de Módulo de Resiliência (MR). Entretanto os materiais asfálticos apresentam comportamento termo-viscoelástico, ou seja, além da temperatura, dependem do tempo e da taxa de aplicação da carga. Por isso, o recente guia de 2002 substituiu o ensaio de MR pelo ensaio de módulo dinâmico para caracterizar as misturas asfálticas.

Desde o lançamento do guia de dimensionamento da AASHTO por meio do NCHRP Project 1-37A (2004), vários questionamentos foram levantados no que diz respeito ao ensaio de módulo dinâmico. A avaliação do MEPDG por alguns pesquisadores indicou que o parâmetro de rigidez adotado, o módulo dinâmico, parece não ser o mais adequado, podendo gerar previsões de desempenho de pavimentos não realísticos. Hu *et al.* (2008), diante destas preocupações, mostraram que, talvez, o ensaio de módulo dinâmico realizado sem a utilização de períodos de repouso não seja o parâmetro apropriado para caracterizar a rigidez das misturas. Em contraste, Loulizi *et al.* (2006) concluíram que o ensaio de módulo dinâmico apresenta uma melhor caracterização das misturas asfálticas em relação ao ensaio de MR, provendo uma completa caracterização do material em uma ampla faixa de temperatura e frequência de carregamento.

O presente trabalho tem o objetivo de realizar uma análise das diferentes sugestões e conclusões encontradas na literatura no que diz respeito aos ensaios de módulo dinâmico e ao MR, buscando contribuir para os esforços em curso relativos ao desenvolvimento de um método de dimensionamento mecânico de pavimentos no Brasil (Soares *et al.*, 2009). Ensaio de MR e módulo dinâmico são realizados em várias temperaturas a fim de se comparar os valores de rigidez obtidos. Resultados de ensaio de MR em equipamento pneumático e hidráulico são também comparados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Módulo de Resiliência (MR)

O ensaio de MR é padronizado no país pelo DNER-ME 133/94. Outros procedimentos existentes deste ensaio são listados abaixo:

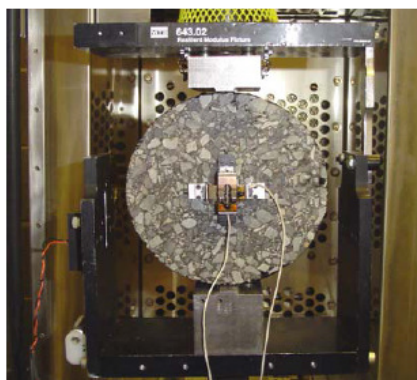
- AASHTO TP31-94: *Standard Test Method for Determination of the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension*;
- NCHRP 1-28 (1996): *Proposed Test Protocol for Determination of the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension*;
- NCHRP 1-28A (2003): *Recommended Standard Test Method for Determination of the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension*.

O ensaio de MR em misturas asfálticas consiste na aplicação de uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo-de-prova (CP) cilíndrico regular. O ensaio pode ainda ser realizado por carregamento axial ou por flexão, entretanto, conforme visto nas normas americanas anteriormente listadas, o mais comum é o ensaio por tração indireta. O carregamento por compressão diametral gera tensões de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga.

Medidores de deslocamento (LVDT's) são colocados na direção horizontal correspondente à tensão gerada a fim de se medir o deslocamento recuperável. Brito (2006) analisou, por meio de diferentes algoritmos (Protocolo P07 do LTPP e NCRHP 1-28/1-28A), a determinação das deformações resilientes, bem como o efeito do pulso, frequência e valor de carregamento no valor das mesmas. O referido autor observou que o MR é função da forma do pulso de carga, frequência e nível de tensão.

O carregamento diametral gera um estado biaxial de tensões. As tensões em um disco comprimido no seu plano diametral foram inicialmente obtidas de forma simplificada por Frocht (1948). Falcão e Soares (2002), em suas considerações sobre o ensaio de compressão diametral em materiais de pavimentação, destacam o efeito do friso de aplicação de cargas na distribuição interna de tensões ao longo do plano diametral do cilindro. Percebeu-se que na presença do friso as tensões de tração ao longo do diâmetro solicitado diminuem seus valores, além do que, devido ao friso, o ponto de deformação máxima não coincide com o ponto de tensão máxima no cilindro.

Nas proposições das normas americanas, os deslocamentos verticais e horizontais são medidos por meio de LVDT's nas duas faces do CP, alinhados ortogonalmente entre si, conforme ilustra a Figura 1(a). Através desse arranjo dos LVDT's torna-se possível o cálculo do coeficiente de Poisson. Observe-se que neste arranjo, procura-se medir os deslocamentos o mais próximo possível do centro do CP, o que nem sempre ocorre em ensaios realizados no Brasil, nos quais os LVDT's são colocados ao longo do diâmetro ou na lateral do CP (Figura 1(b)), de modo que o deslocamento obtido é relativo a todo o diâmetro e não somente ao centro do cilindro. No Brasil, é comum utilizar valores arbitrários para o coeficiente de Poisson, comumente entre 0,2 e 0,3. Loulizi *et al.* (2006) realizaram o ensaio de MR medindo os deslocamentos verticais e horizontais nas duas faces do CP e observaram uma variabilidade entre os resultados encontrados nas duas faces. Atribuíram-se a este fenômeno a imperfeição na centralização dos CP's, as diferentes orientações dos agregados nos dois lados do CP e a heterogeneidade na distribuição de vazios ao longo da espessura do CP.



(a) LVDT's no centro do CP



(b) LVDT na lateral do CP

Figura 1: Arranjo dos LVDT's para medições dos deslocamentos

O ensaio de MR no Brasil é realizado em apenas uma temperatura e uma frequência (25°C e 1Hz, respectivamente), enquanto as normas americanas recomendam o ensaio em três temperaturas: 5°C, 25°C e 40°C. A frequência de aplicação da carga é de 60 ciclos por minuto, com um tempo de aplicação de carga de 0,1s e 0,9s de repouso ou descarregamento. O registro dos deslocamentos é realizado pelos LVDT's após 300, 400 e 500 aplicações de carga *P*. Neste procedimento de ensaio, os deslocamentos considerados são aqueles que são recuperáveis. Os deslocamentos plásticos, ou seja, deslocamentos permanentes, não devem ser contabilizados para o cálculo do MR. Vale ressaltar

que durante o pulso de deslocamento obtido associado a um dado pulso de carregamento, desenvolvem-se deformações viscoelásticas que são, no cálculo do MR, parcialmente contabilizadas como deformações elásticas. Percebe-se, portanto, que o MR não é um parâmetro puramente elástico para misturas asfálticas, fato que é considerado em muitos programas computacionais de análise estrutural de pavimentos.

2.2. Módulo Dinâmico

Desde a década de 1960 o ensaio de módulo dinâmico vem sendo investigado como substituto do ensaio de MR. 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. Tantas as características elásticas quanto as viscoelásticas podem ser obtidas por meio deste ensaio.

O ensaio consiste basicamente na aplicação de um carregamento axial semi-senoidal (*haversine*) em CP's cilíndricos, sendo medidos os deslocamentos verticais correspondentes. Duas normas americanas podem ser usadas para a realização do ensaio: AASHTO TP 62 e ASTM D 3497. Vale ressaltar que ambas as normas determinam que a amostra seja submetida a um carregamento por compressão axial. Witczak e Root (1974) observaram que os ensaios realizados à tração-compressão são mais representativos do comportamento em campo.

O ensaio pode ser realizado em várias temperaturas e frequências, possibilitando dessa forma a construção de curvas mestras, importante instrumento na caracterização de misturas asfálticas para o dimensionamento e análise de pavimentos (Medeiros, 2006). Vale lembrar que no ensaio de MR, se realizado de acordo com a norma, não é possível a construção de curvas mestras. A norma da AASHTO para o ensaio de módulo dinâmico estabelece um procedimento de ensaio com frequências que variam de 0,1Hz a 25Hz em temperaturas de -10°C a 54,4°C, possibilitando assim o desenvolvimento de curvas mestras. Entretanto, a norma da ASTM estabelece apenas três temperaturas de ensaio (5°C, 25°C e 40°C) e três frequências de carregamento (1Hz, 4Hz e 16Hz), tornando imprecisa a construção das curvas. Outra diferença importante entre as duas normas se refere à magnitude do carregamento. A AASHTO TP 62 destaca que o carregamento dinâmico depende da rigidez do material, podendo variar de 15kPa a 2800kPa. Carregamentos de maior magnitude são necessários, portanto, para os ensaios em baixas temperaturas. No entanto, a norma da ASTM designa como carregamento valores de até 200kPa, até mesmo em temperaturas baixas. As duas normas se diferenciam ainda nas dimensões dos CP's moldados para o ensaio. A norma da AASHTO determina que as amostras devem apresentar 100mm de diâmetro e 150mm de altura, enquanto que a da ASTM recomenda CP's com diâmetro mínimo de 100mm e relação altura-diâmetro de 2 para 1.

A tensão aplicada (σ) e a deformação correspondente medida (ε), usadas no cálculo do módulo dinâmico e do ângulo de fase, podem ser representadas pelas Equações 1 e 2:

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

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

onde,

σ_0 = amplitude de tensão aplicada;

ε_0 = amplitude de deformação medida;

$\omega = 2\pi f$, frequência angular;

$f = 1/T$, frequência;

T = período;

δ = ângulo de fase, obtido através da Equação 3.

$$\delta = \frac{\Delta t}{T} 360^\circ \quad (3)$$

onde,

Δt = defasagem entre a onda de tensão aplicada e a correspondente deformação medida.

Para os materiais puramente elásticos, os picos de tensão e deformação coincidem no mesmo instante de tempo. Entretanto, devido à natureza viscoelástica, as misturas asfálticas apresentam uma defasagem entre a tensão aplicada e a deformação medida. Esta defasagem é representada pelo ângulo de fase δ . Portanto, para os materiais puramente elásticos, $\delta = 0^\circ$, e para os puramente viscosos, $\delta = 90^\circ$. O módulo dinâmico é calculado, usando a Equação 4.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (4)$$

3. PERÍODO DE REPOUSO

Devido à sua natureza viscoelástica, as misturas asfálticas apresentam um comportamento estrutural dependente da temperatura e do tempo de carregamento. Consequentemente, este comportamento é influenciado pelos períodos de repouso decorrentes do intervalo entre as passagens das cargas devido ao tráfego em um pavimento. A norma do ensaio de módulo dinâmico determina um carregamento cíclico sobre a mistura desconsiderando o tempo de repouso. O trabalho de Hu *et al.* (2008) destaca este fato como uma limitação do ensaio, impossibilitando a caracterização do material e a previsão de comportamento de uma forma mais precisa.

Sabe-se que o carregamento devido ao tráfego em uma rodovia não é aplicado continuamente sobre uma estrutura de pavimento. Hu *et al.* (2008) determinam três situações onde ocorre período de repouso entre as cargas aplicadas:

- período de repouso entre veículos viajando em diferentes velocidades;
- período de repouso entre veículos viajando na mesma velocidade;
- período de repouso que ocorre entre a passagem do eixo dianteiro e traseiro de um caminhão longo.

Na literatura o período de repouso entre as aplicações da carga devido ao tráfego tem sido estimado dividindo-se o número de segundos em um dia (86400s) pelo número de eixos padrão diário de uma determinada rodovia (Lytton *et al.*, 1993). Desta maneira, os períodos de repouso para diferentes volumes de tráfego em uma rodovia são apresentados na Tabela 1. Comparando com o tempo de carregamento convencionalmente adotado de 0,1s, observa-se da Tabela 1 que o tempo de repouso não deve ser desprezado. Entretanto este parâmetro não é aplicado no ensaio de módulo dinâmico.

Tabela 1: Período de repouso estimado (Hu *et al.*, 2008)

Volume de tráfego diário (Número de eixos padrão)	41	411	1370	4110	13699
Período de repouso (s)	2102,4	210,2	63,1	21,0	6,3

3.1. Influência do Período de Repouso na Rigidez das Misturas Asfálticas

No trabalho de Hu *et al.* (2008), é retratada a influência do período de repouso na rigidez das misturas asfálticas. Uma das principais diferenças entre o ensaio de módulo dinâmico e o MR se refere ao tempo de repouso. Enquanto no primeiro, a carga é aplicada continuamente sobre a

amostra, no ensaio de MR, um tempo de repouso é aplicado entre os pulsos de carga. Para um material puramente elástico, o efeito do tempo de repouso seria nulo, no entanto, os materiais viscoelásticos apresentam “memória” com relação à história de carregamento (Christensen, 1982). Para este tipo de material, portanto, a relação tensão/deformação tem significativa influência do tempo de repouso.

Na Figura 2 (Hu *et al.*, 2008), são apresentadas as curvas de tensão e deformação obtidas em um ensaio de módulo dinâmico e em um ensaio de MR. Observa-se no primeiro ensaio a ausência do período de repouso. Em contraste, um período de repouso de 0,4s é aplicado no ensaio de MR.

Percebe-se ainda na Figura 2 que os primeiros picos de deformação para os dois ensaios são bem próximos. Entretanto, ao se passar para o segundo pico de deformação, observa-se que o mesmo é significativamente maior no ensaio de MR. Fenômenos similares podem ser observados para os demais ciclos de carregamento. Dessa forma, considera-se para o cálculo do módulo dinâmico apenas a parcela elástica do pulso de deformação, obtendo-se, assim, valores de rigidez mais elevados neste ensaio.

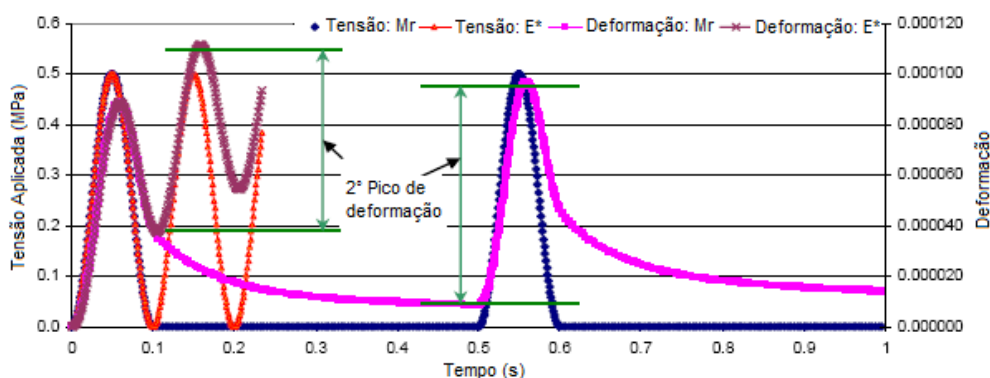


Figura 2: Comparação entre o ensaio de MR e módulo dinâmico (Hu *et al.*, 2008)

Diante do exposto, no trabalho de Hu *et al.* (2008), é proposto um novo ensaio de módulo, consistindo basicamente no mesmo ensaio de módulo dinâmico (tipo de equipamento, temperatura, frequência), adicionando o período de repouso entre as cargas. Esta nova abordagem, entretanto, apresenta suas desvantagens. Considerando a razão entre o período de repouso e o tempo de carregamento igual a 9, o novo ensaio proposto seria 9 vezes mais longo que o ensaio usual. Portanto, se o tempo de ensaio para determinação do módulo dinâmico em uma determinada temperatura (em seis frequências diferentes) leva cerca de 20 minutos, será necessário um pouco mais que três horas para a realização do ensaio adicionando o período de repouso, tornando-o mais dispendioso. Por este motivo, Hu *et al.* (2008) propõem um método alternativo para estimar a rigidez do material baseado nos dados oriundos do ensaio de módulo dinâmico convencional. Este método consiste primeiramente na determinação do módulo dinâmico e do ângulo de fase de uma determinada mistura asfáltica em laboratório. A partir destes resultados, usando-se a teoria da viscoelasticidade linear, pode-se converter os dados obtidos no domínio da frequência para o domínio do tempo, através de expressões chamadas de séries de Prony (Souza e Soares, 2002; Sousa e Soares, 2007). Através de processos de interconversão entre as propriedades, pode-se obter a propriedade *creep compliance* ($D(t)$) a partir do módulo dinâmico (E^*). Baseado na integral de convolução de Boltzmann (Equação 5), pode-se determinar analítica ou numericamente a deformação ($\epsilon(t)$) obtida para uma dada tensão aplicada (σ) com um específico tempo de carregamento e período de repouso.

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t-\tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \quad (5)$$

Comparando os resultados, Hu *et al.* (2008) mostram que os valores de rigidez obtidos pelo método alternativo são próximos dos medidos em laboratório. Entretanto uma consideração pode ser feita a respeito desta nova metodologia usada por Hu *et al.* para determinação da rigidez. Para se comparar dados de módulo dinâmico com dados de MR, o tempo de carregamento deve ser o mesmo nos dois ensaios. No guia de dimensionamento da AASHTO, a conversão do domínio do tempo (t) para o domínio da frequência (f) em Hz é baseada na Equação 6:

$$f = \frac{1}{t} \quad (6)$$

No recente estudo conduzido por Al-Qadi e seus colaboradores (Loulizi *et al.*, 2006), mostrou-se que uma correlação entre o módulo dinâmico e o MR em misturas asfálticas poderia ser satisfatoriamente obtida quando a frequência angular é convertida em frequência cíclica, dividindo-se por 2π . Dessa forma, a conversão do domínio do tempo para o domínio da frequência seria dada pela Equação 7:

$$f = \frac{1}{2\pi t} \quad (7)$$

Pode-se mostrar, dessa forma, que o MR obtido para um pulso de carga com duração de 0,03s seria equivalente ao módulo dinâmico obtido em uma frequência de 5,2Hz. Em outro estudo, Al-Qadi *et al.* (2008) destacam que, apesar de ser possível aplicar esta metodologia de conversão entre o ensaio de MR e módulo dinâmico, a mesma não é aplicável para pulsos de carga devido ao tráfego.

Daniel e Kim (1998) usaram outro método aproximado para a conversão proposto por Christensen (1982). De acordo com os referidos autores, tempo e frequência são inversamente proporcionais, mas a relação entre o tempo obtido para a função fluência (*creep compliance*) e a frequência do módulo dinâmico não é claramente definida, sendo uma aproximação comumente usada a da Equação 8:

$$f = \frac{0,1}{t} \quad (8)$$

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

No presente estudo foi utilizada uma mistura asfáltica do tipo CA (Concreto Asfáltico), seguindo a metodologia de dosagem baseado nas especificações Superpave do SHRP (*Strategic Highway Research Program*). Foi utilizado Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), classificado por penetração como CAP 50/70, produzido na Refinaria de Duque de Caxias – REDUC. Os agregados utilizados são de origem granítica e provenientes da pedreira de Itaitinga, situada a aproximadamente 30km da cidade de Fortaleza – CE. A distribuição granulométrica para a mistura estudada é apresentada na Figura 3.

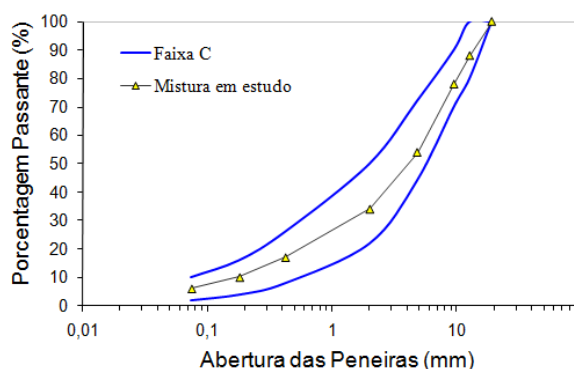


Figura 3: Curva granulométrica da mistura em estudo

Foram moldados quatro CP's cilíndricos regulares, sendo dois para os ensaios de módulo dinâmico e dois para os ensaios de MR. Todos os CP's ensaiados apresentaram volume de vazios em torno de 4%. Abaixo estão relacionadas algumas características dos dois ensaios comparados no presente estudo.

Para o ensaio de MR, os CP's foram confeccionados com 100mm de diâmetro e 65mm de altura, ensaiados na UTM-25 nas temperaturas de -5°C , 5°C , 15°C , 25°C e 40°C . Para o mesmo ensaio de MR, os CP's também foram ensaiados em um equipamento pneumático, onde o ensaio foi realizado a 25°C , sendo o controle de temperatura realizado por uma câmara com sistema de aquecimento e refrigeração acoplado a um termostato. Em ambos os equipamentos, a frequência aplicada é de 1,0Hz para cada temperatura estudada, sendo 0,1s o tempo de aplicação de carga e 0,9s de repouso ou descarregamento. O ensaio foi realizado a compressão diametral. Vale ressaltar que o ensaio realizado na UTM-25 apresenta carregamento semi-senoidal, enquanto que o ensaio realizado no equipamento pneumático apresenta carregamento em forma de pulso-descanso. Porém, ambos com o mesmo tempo de carregamento (0,1s) e de repouso (0,9s), embora formas de pulso de carga distintas.

Para o ensaio de módulo dinâmico, os CP's utilizados foram confeccionados com 100mm de diâmetro e 150mm de altura, ensaiados na UTM-25 nas temperaturas de -5°C , 5°C , 15°C , 25°C e 40°C com frequências de 0,1Hz, 0,5Hz, 1,0Hz, 5Hz, 10Hz e 20Hz aplicadas para cada temperatura estudada, sendo realizado carregamento axial cíclico semi-senoidal sem tempo de repouso.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Módulo Dinâmico

A Figura 4(a) apresenta os valores do módulo dinâmico medidos para a mistura em estudo em função da frequência de carregamento. Como é de se esperar, para uma determinada frequência constante, o valor do módulo decresce com o aumento da temperatura. Mantendo-se constante a temperatura, a magnitude do módulo dinâmico se eleva com o aumento da frequência. A Figura 4(b) apresenta os resultados de ângulo de fase obtidos no ensaio. Observa-se que para as temperaturas de -5°C , 5°C e 15°C , o ângulo de fase é reduzido à medida que se aumenta a frequência, ou seja, a mistura vai se tornando mais próxima do comportamento elástico com o aumento da frequência. Entretanto para as temperaturas de 25°C e 40°C , o comportamento do ângulo de fase é diferente. Pode-se dizer que na temperatura de 25°C , o ângulo de fase se mantém constante com a variação da frequência. No entanto a 40°C , o ângulo de fase aumenta à medida que se eleva a frequência. Percebe-se, dessa forma, que a temperatura de 25°C representa uma zona de transição para o ângulo

de fase. Ou talvez, a temperaturas mais elevadas novas variáveis, como deformação permanente, são introduzidas no ensaio, tornando mais complexa a interpretação dos resultados.

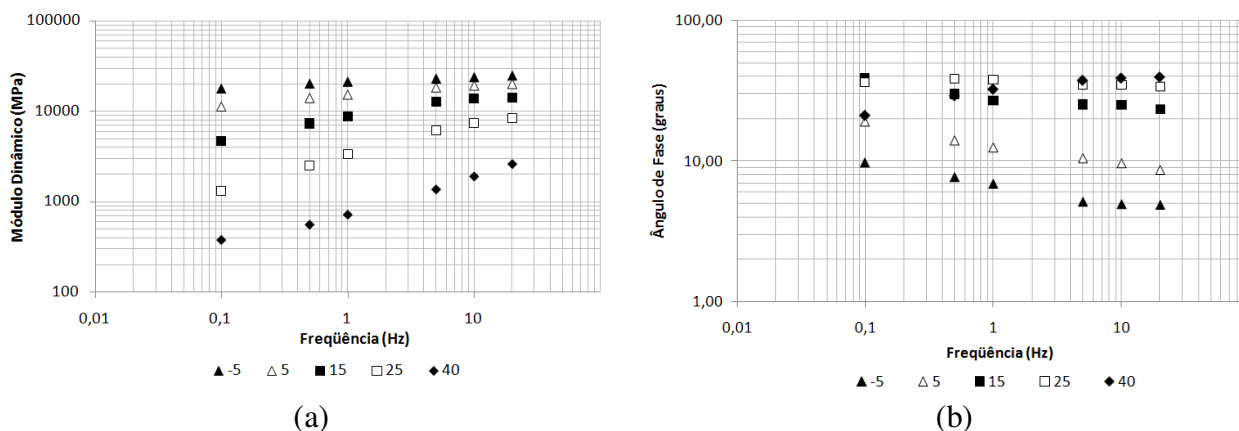


Figura 4: Resultados para a mistura estudada de: (a) módulo dinâmico e (b) ângulo de fase

Curvas mestras foram desenvolvidas a fim de se caracterizar o material em um intervalo maior de frequência. O fator de deslocamento para cada temperatura, necessário para o desenvolvimento das curvas, foi calculado a partir da equação de Arrhenius. As Figuras 5(a) e 5(b) apresentam as curvas mestras para o módulo dinâmico e o ângulo de fase, respectivamente. Observa-se que para frequências baixas, o módulo cresce linearmente. A partir de um determinado valor de frequência, a rigidez do material tende a estabilizar, alcançando níveis constantes. No que diz respeito ao ângulo de fase, verifica-se que para frequência baixas, da ordem de 0,001Hz a 0,1Hz, o valor do mesmo tende a aumentar com o aumento da frequência. Atinge-se um valor de pico igual a aproximadamente 40° e, então, começa a decair à medida que os valores de frequência se elevam. Percebe-se que por meio deste ensaio pode-se obter uma completa caracterização da mistura asfáltica levando em conta o efeito da frequência e da temperatura.

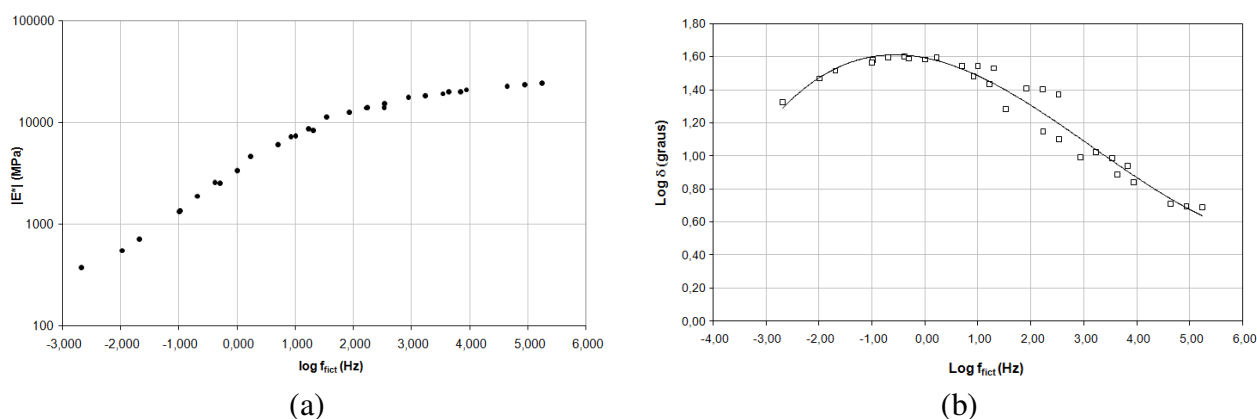


Figura 5: Curva mestra para (a) o módulo dinâmico e para (b) o ângulo de fase

5.2. Comparação entre MR e Módulo Dinâmico

Na comparação dos resultados de MR obtidos no equipamento pneumático e na UTM-25 (hidráulico) na temperatura de 25°C e frequência igual a 1,0Hz, obteve-se no primeiro um valor igual a 5.180MPa e no segundo um valor de 3.914MPa. Ocorreu, portanto, uma redução de aproximadamente 24% do valor do MR obtido no pneumático. Embora em ambos os equipamentos o carregamento seja com 0,1s de carga e 0,9s de repouso, a forma do pulso deste carregamento é distinta devido às diferenças inerentes a um equipamento pneumático e um hidráulico. E, como

observou Brito (2006), esta forma de pulso afeta o valor da deformação resiliente, e conseqüentemente o MR.

Para se comparar dados de MR e módulo dinâmico, é necessário que os tempos de carregamento em ambos os ensaios sejam equivalentes. No caso da presente investigação, o tempo de carregamento nos dois casos é de 0,1s. Os mesmos diferem no tempo de repouso. E, como visto mais adiante, isso pode afetar os resultados, tanto mais quanto maior a temperatura. Várias formas de conversão do domínio do tempo para o domínio da frequência têm sido apresentadas na literatura (Christensen, 1982; Daniel e Kim, 1998; Loulizi *et al.*, 2006; Dongre *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2008). Três formas de conversão apresentadas anteriormente foram adotadas no presente trabalho para se comparar os valores dos diferentes módulos, ou seja, o MR obtido a partir da UTM-25 e o módulo dinâmico obtido neste mesmo equipamento hidráulico. O tempo de carregamento utilizado no ensaio de MR foi de 0,1s, e as frequências utilizadas para comparação foram de 10Hz ($1/t$), 1,59Hz ($1/2\pi t$) e 1,0Hz ($0,1/t$). Os dados nas frequências de 1,0Hz e 10Hz foram obtidos diretamente do ensaio de módulo dinâmico. Para a frequência de 1,59Hz, o valor do módulo foi obtido substituindo-se o valor da frequência na expressão da curva de regressão dos dados apresentados na Figura 4(a) traçada para cada temperatura. As Figuras 6(a), 6(b) e 6(c) mostram gráficos com os resultados do módulo dinâmico e do MR para as temperaturas investigadas. Observa-se que para a frequência de 10Hz, os módulos apresentaram valores distintos, distantes da linha de igualdade. O mesmo não ocorre, entretanto, no caso das frequências de 1,59Hz e 1,0Hz, onde se têm valores de módulos bem próximos em todas as temperaturas. Fica claro, portanto, que nestas frequências, há uma correlação satisfatória entre os dados de módulo dinâmico e de MR, desde que ensaiados com o mesmo tempo carregamento, no caso 0,1s. O efeito da forma do pulso de carga não é considerado no presente artigo, e observa-se que esta forma é a mesma em ambos os ensaios.

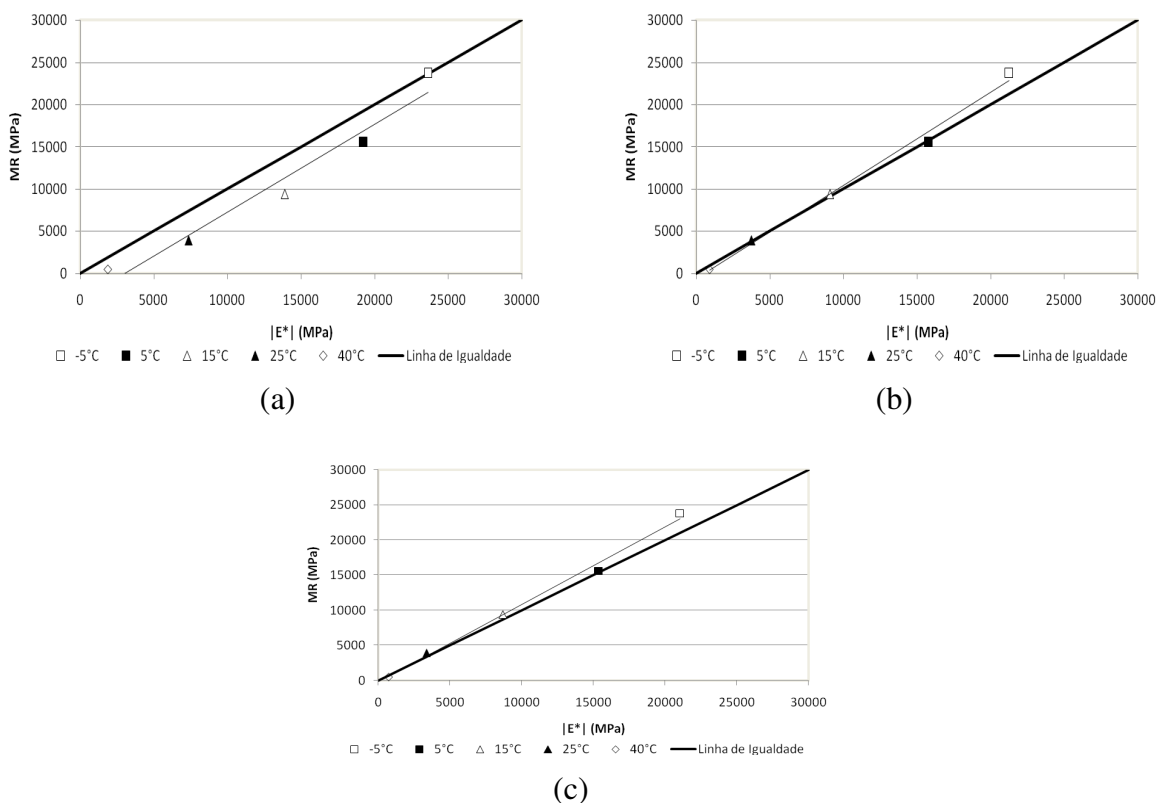


Figura 6: Comparação entre MR e módulo dinâmico: (a) $f = 1/t = 10\text{Hz}$; (b) $f = 1/2\pi t = 1,59\text{Hz}$; (c) $f = 0,1/t = 1,0\text{Hz}$

Na Figura 7, é apresentada a relação entre os resultados de módulo dinâmico e de MR obtido na UTM-25 em função da temperatura. Verifica-se que à medida que se aumenta a temperatura, observa-se uma tendência de aumento da razão entre os módulos para $f = 10\text{Hz}$, atingindo-se na temperatura de 40°C um valor igual a 3,7. Para as outras duas frequências, a razão se mantém praticamente com valor unitário para todas as temperaturas, exceto para a temperatura de 40°C , onde a razão alcança um valor aproximadamente igual 1,5. Levando em consideração que a relação entre o domínio do tempo e o domínio da frequência não são simplesmente o inverso um do outro, verifica-se que o tempo de repouso não influi significativamente nos valores de módulo para temperaturas baixas. Entretanto, para temperaturas elevadas da ordem de 40°C , este efeito é significativo e deve ser considerado nos modelos de previsão de fadiga e deformação permanente que incorporam em suas equações a rigidez da misturas. Utilizando-se, por exemplo, o valor da rigidez obtida pelo ensaio de módulo dinâmico a 40°C no modelo de fadiga empregado no guia de dimensionamento da AASHTO, a vida de fadiga do pavimento analisado seria superestimada. Contudo, há de se observar mais uma vez que um ensaio a 40°C pode estar sendo influenciado por outros efeitos tais como deformação permanente.

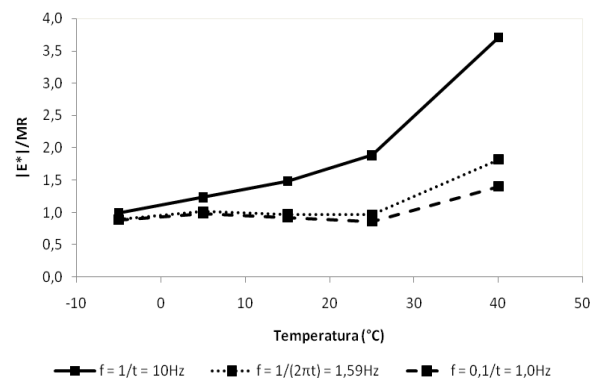


Figura 7: Relação entre módulo dinâmico e MR

6. CONCLUSÕES

Foi realizado neste trabalho um estudo comparativo entre os ensaios de módulo dinâmico e MR realizado em misturas asfálticas. O MR é tradicionalmente tratado como um parâmetro puramente elástico, entretanto, sabe-se que na forma como o ensaio é realizado, a deformação recuperável utilizada no cálculo deste parâmetro envolve não só uma parcela elástica, mas também uma parcela viscoelástica. Avaliou-se o efeito do período de repouso entre as cargas aplicadas na obtenção da rigidez das misturas. Diferentemente do ensaio de MR, por não considerar este tempo de descanso, o ensaio de módulo dinâmico tem sido contestado. Foram realizados, então, ensaios de módulo dinâmico e MR em várias temperaturas a fim de se comparar os valores de rigidez obtidos nos dois ensaios. Sabendo-se que para realizar a comparação é necessário que o tempo de carregamento nos dois ensaios seja o mesmo, diferentes formas de conversão do domínio do tempo para o domínio da frequência encontradas na literatura foram utilizadas. Observou-se que para a relação $f = 1/t$, os valores do módulo dinâmico eram superiores aos valores de MR. Entretanto, para relações como $f = 0,1/t$ e $f = 1/(2\pi t)$, os valores dos módulos foram bem próximos, principalmente para temperaturas até 25°C . Nestes casos, a diferença entre os tempos de repouso nos dois ensaios pouco influenciou nos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO TP 62-03 (2005) *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

- AASTO TP 31-94 (1994) *Standard Test Method for Determination of the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Al-Qadi, I. L.; W. Xie e M. A. Elseifi (2008) Frequency Determination from Vehicular Loading Time Pulse to Predict Appropriate Complex Modulus in MEPDG. *Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists*, Vol. 77. pp. 739-771.
- ASTM D 3497 (1979) *Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*. American Society for Testing and Materials.
- Barksdale, R. NCHRP 1-28 (1996) *Proposed Test Protocol for Determination of Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension*.
- Brito, L.A.T. (2006) Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Christensen, R. M. (1982) *Theory of Viscoelasticity*. Academic Press, New York, EUA.
- Daniel, J. S e Y. R. Kim (1998) Relationships among Rate-Dependent Stiffness of Asphalt Concrete Using Laboratory and Field Test Methods. *Transportation Research Record 1630*, 3-9. TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- 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.
- Dongre, R.; L. Myers e J. D'Angelo (2006) Conversion of Testing Frequency to Loading Time: Impact on Performance Predictions Obtained from the M-E Pavement Design Guide. *85th Transportation Research Board Annual Meeting*, No. 06-2394, Washington D.C.
- Dormon, G. M. e C. T. Metcalf (1965) Design Curves for Flexible Pavements Based on Layered System Theory. Highway Research Record 71, Highway Research Board.
- Falcão, M. F. B e J. B. Soares (2002) Considerações sobre o Ensaio de Compressão Diametral no estudo de Materiais de Pavimentação. XVI Congresso de Pesquisa e Ensaio em Transportes, ANPET, Natal.
- Frocht, M. M. (1948) Photoelasticity Vol. II, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.
- Hu, S.; F. Zhou.; X. Hu.; T. Scullion.; X. Qi.; L. F. Walubita e G. Claros (2008) Consideration of HMA Resilient Modulus (M_r) for M-E Pavement Design and Analysis. *Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists*, Vol. 77. pp. 663-702.
- Kerkhoven, R. E. e G. M. Dormon (1953) Some Considerations on the California Bearing Ratio Method for the Design of Flexible Pavements. Shell Bitumen Monograph N° 1, Amsterdam.
- Loulizi, A.; G. W. Flintsch.; I. L. Al-Qadi e D. W. Mokarem (2006) Comparing Resilient Modulus and Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt as Material Properties for Flexible Pavement Design. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, N° 1970, National Research Council, Washington D.C., pp. 161-170.
- Lytton, R. L.; J. Uzan.; E. G. Fernando.; R. Roque.; D. Hiltunen e S. M. Stoffels (1993) Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes, SHRP A-357, National Research Council, Washington, D.C.
- Medeiros Jr., M. S. (2006) 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.
- NCHRP 1-37A (2004) *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Final Report. TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Saal, R. N. e P. S. Pell (1960) *Kolloid-Zeitschrift* MI, Heft 1.
- Silva, H. N.; P. C. Sousa.; P. C. Araujo Jr.; J.B Soares e A. S. Holanda (2008) Metodologia Simplificada de Análise Numérica Dinâmica Viscoelástica de Pavimentos Asfálticos. 39ª RAPV/13º ENACOR. Recife, Pernambuco.
- Souza, F. V e J. B. Soares (2002) Previsão do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a partir dos Resultados do Ensaio de Creep Estático. Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Natal, p. 29-41.
- Souza, F. V e J. B. Soares (2003) Efeito da Consideração do Comportamento Viscoelástico Linear do Revestimento no Cálculo das Tensões e Deslocamentos em Pavimentos Asfálticos. XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET.
- Sousa, P. C e J. B. Soares (2007) 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.
- Soares, J. B.; A. Mateos e L. M. G. Motta (2009) Aspectos gerais de métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos de vários países e a relação com um novo método brasileiro. A ser publicado na Revista Pavimentação, ABPv, Outubro de 2009.

- Timoshenko, S. P e J. N. Goodier (1951) *Theory of Elasticity*. New York: McGraw-Hill.
- Witczak, M. W. NCHRP 1-28A (2003) *Recommended Standard Test Method for Determination of the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension*.
- Witczak, M. W e R. E. Root (1974) *Summary of Complex Modulus Laboratory Test Procedures and Results*, American Society for Testing and Materials, pp. 67-94.

Pedro Custódio de Araújo Júnior (pcaengenharia@gmail.com)

Wellington Lorrán Gaia Ferreira (wlorrán@hotmail.com)

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)

Jorge Barbosa Soares (jsoares@det.ufc.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará

Campus do Pici, s/n Bloco 703 CEP 60455-760 – Fortaleza, CE, Brasil