

USO DA TEORIA DA VISCOELASTICIDADE E REGRESSÃO ESTATÍSTICA PARA PREVISÃO DO MÓDULO DINÂMICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM FUNÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Klaus Machado Theisen

Aluno do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - UFRGS

Jorge Augusto Pereira Ceratti

Docente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - UFRGS

RESUMO

O artigo objetivou desenvolver um modelo de previsão do módulo dinâmico (MD) de misturas asfálticas em função de seu módulo de resiliência (MR), empregando teoria da viscoelasticidade e regressão estatística. Uma breve introdução e uma breve revisão sobre Viscoelasticidade Linear e os ensaios de MR e MD são apresentadas. Após, é descrito o procedimento da extração da curva de fluência em função dos resultados de MR e de obtenção do MD e ângulo de fase (AF). Notou-se que para tempo de pico de deslocamento maior que 0,06 s não há influência da parcela elástica no deslocamento e o parâmetro “m” correlaciona-se direta e linearmente ao ângulo de fase (AF) da mistura à frequência (f) de 1 Hz da carga senoidal, o mesmo ocorrendo para f entre 0,01 e 25 Hz. Porém, a determinação do AF em função de “m” não condiz com resultados experimentais vistos na literatura, mostrando aumento do AF com f. Regressões lineares espaciais mostraram que o melhor ajuste envolve os Módulos Instantâneo (MI) e Total (MT) – obtidos segundo a NCHRP-285 – com o MD a 1 Hz, cujo coeficiente de determinação (R^2) foi 0,9776. Regressões lineares simples mostraram boas correlações entre MR e/ou MI com MDs obtidos a f entre 0,01 Hz e 25 Hz. Os coeficientes angular e linear dos ajustes seguem, respectivamente, uma variação potencial ($R^2 > 0,988$) e quadrática ($R^2 > 0,955$) bem definidas em função de f.

ABSTRACT

The paper aimed to develop a prediction model of dynamic modulus (MD) of asphalt mixes in function of their resilient modulus (MR) by using viscoelasticity theory and statistics. A brief introduction and a brief overview about Linear Viscoelasticity, and MR and MD tests are shown. After that, the procedure of extraction of creep compliance in function of MR results are described, as well as the procedure of evaluation of MD and phase angle (AF). It has been noticed that for displacement peak times greater than 0,06 s there is not influence of elastic displacements on total displacements. It has been noticed also that the “m” parameter correlates itself directly and linearly to the mixture’s Phase Angle (AF) taken to the frequency of 1 Hz of harmonic sinusoidal load, in which the same happened to frequencies between 0,01 and 25 Hz. However, the AF determination in function of “m” does not match with experimental data shown in literature, showing increasing of AF when f increases. Multilinear Regression analysis has shown that the best fitting takes into account the Instantaneous Moduli (MI) and Total Moduli (MT) – obtained according NCHRP-285 – for MD test data fitting, whose determination coefficient (R^2) has resulted 0,9776. Linear regression analysis has shown good correlations between MR and/or MI with MD data obtained to f ranging from 0,01 Hz to 25 Hz. The angular and linear coefficients of linear regressions follow, respectively, a Power-law function ($R^2 > 0,988$) and a parabolic function ($R^2 > 0,955$) well defined in function of f.

1.INTRODUÇÃO

Atualmente, grande parte dos projetos de pavimentos flexíveis no Brasil toma como parâmetro constitutivo de misturas asfálticas o Módulo de Resiliência (MR). Tal parâmetro é atrativo aos projetistas, pois sua obtenção em laboratório e/ou em campo é fácil, além de existirem muitos *softwares* baseados na teoria da elasticidade onde o MR é aplicado para análise mecânica de pavimentos (exemplos: ELSYM5, FLAPS2, EVERSTRESS).

Porém, tomar o MR como parâmetro constitutivo de misturas asfálticas é assumir seu comportamento como elástico linear, o que não é real, dadas as evidências da viscoelasticidade das misturas asfálticas em trabalhos nacionais como Falcão e Soares (2002), Soares e Souza (2002) e Momm (2001), além de uma série de artigos internacionais. Zhang *et al.* (1997) relataram que, para um material viscoelástico, adotar MR e coeficiente de Poisson como parâmetros constitutivos é conceitualmente incorreta.

Pesquisas recentes sobre o comportamento de misturas asfálticas têm buscado obter parâmetros que descrevem o seu comportamento viscoelástico. Entre estes, os mais obtidos e conhecidos são o Módulo Dinâmico (MD) e o Ângulo de Fase (AF). Desde os anos 60 o MD é pesquisado como uma alternativa ao MR utilizado atualmente na caracterização de misturas asfálticas. Papazian (1962) realizou ensaios aplicando tensões senoidais a corpos de prova, medindo as deformações resultantes, concluindo que os conceitos de viscoelasticidade poderiam ser aplicados no desenvolvimento e no estudo dos pavimentos asfálticos.

A consideração o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas e o efeito da frequência de carregamento nestas faz com o que o MD e o AF substituam o tradicional MR. O uso destes parâmetros é freqüente em países que desenvolvem grandes pesquisas na área de misturas asfálticas, como Estados Unidos e França. Porém, no Brasil, esta abordagem é pouco conhecida pelos projetistas e quase não é aplicada em projetos de pavimentos flexíveis.

Várias pesquisas no Brasil têm utilizado o MR em estudos para comparar desempenhos de misturas asfálticas. Entre estes, destacam-se os da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP); Universidade Federal do Ceará (UFC); Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ); e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), destacando-se a dissertação de Brito (2006). Porém, o uso do MD em pesquisas nestas Universidades é pequeno. Além disto, novas misturas asfálticas desenvolvidas e estudadas fora do Brasil não são caracterizadas pelo MR, mas sim pelo MD e AF, inviabilizando a comparação de desempenho das misturas Brasileiras com as do exterior e sua aplicação em métodos de projeto mais recentes, como o AASHTO Design Guide (2004).

Assim, aproveitando-se da grande produção de dados de ensaios de MR e considerando-se a tendência de uso do MD em pesquisas e projetos práticos, este artigo objetiva contribuir para o desenvolvimento de equações que correlacionem resultados obtidos de ensaios de MR com parâmetros referentes ao ensaio de MD, empregando para isso ferramentas estatísticas e principalmente os conceitos da teoria da Viscoelasticidade Linear.

2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.Teoria da Viscoelasticidade Linear

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.

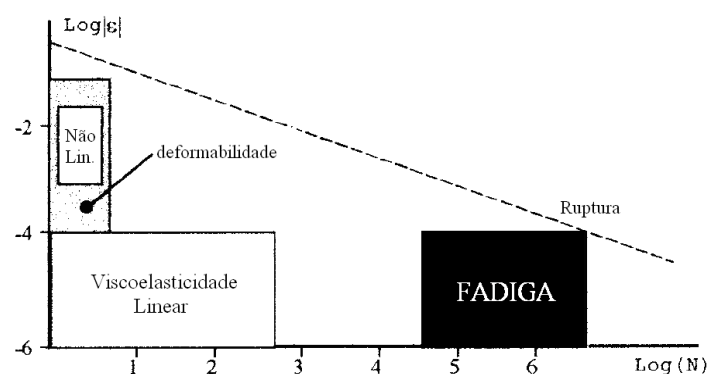


Figura 1: Limites de comportamento das misturas asfálticas (Di Benedetto *et al.*, 2001)

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: somas de funções exponenciais obtidas da solução das equações dos modelos generalizados de Kelvin e Maxwell.

Assim, sabido o 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 é aplicável para problemas unidimensionais, trabalhando-se apenas com tensões e deformações, exemplificando-se o ensaio de MD (carga uniaxial).

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. Tal aplicação consiste na substituição algébrica de parâmetros constitutivos elásticos lineares por parâmetros viscoelásticos lineares na solução do problema após aplicação de transformadas integrais (Laplace ou Fourier) na solução elástica do problema.

2.2. Módulo de Resiliência

O termo “resiliência” na pavimentação foi utilizado primeiramente por Hveem (1955), que adotou o termo alegando que as deformações nos pavimentos são maiores que de sólidos elásticos que lida o engenheiro. Na verdade, o termo resiliência significa energia armazenada

num corpo deformado elasticamente, devolvida quando cessam as tensões; corresponde a energia potencial de deformação (Medina, 1997). Em resumo, o MR 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 MR.

A obtenção em laboratório consiste na moldagem de corpos-de-prova cilíndricos (tipo Marshall), comprimindo-os diametralmente com uma carga repetida de frequência 1 Hz, onde em cada ciclo carrega-se o corpo-de-prova durante 0,1 s e os 0,9 s restantes são descarregados, assim medindo-se os deslocamentos resultantes desta solicitação. A Figura 2 mostra o comportamento típico de misturas asfálticas à referida solicitação:

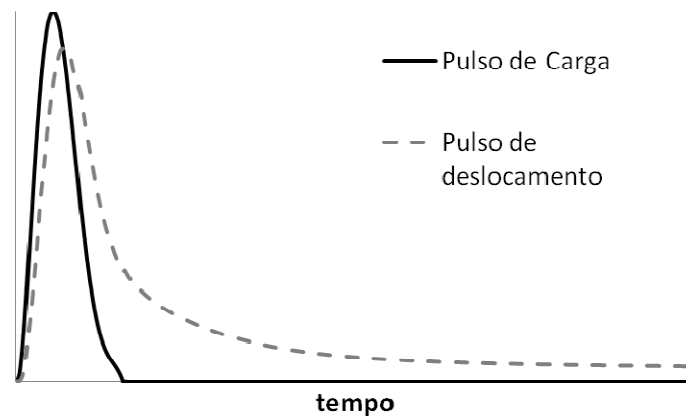


Figura 2: Exemplo típico de curvas de carga e deslocamento no ensaio de MR

Obtidos os dados do ensaio, o MR é obtido utilizando-se equações tipo Lobo Carneiro (1943) e Hondros (1959), relacionando o deslocamento resiliente Δ com o MR. O deslocamento Δ é obtido do pulso de deslocamentos, onde há vários procedimentos de norma existentes que descrevem como extraí-lo (vistos em Brito, 2006). Dois são aqui descritos:

- O método da ASTM D4123 (1995), usual no Brasil, que obtém Δ tomando-se a diferença de ordenadas entre o pico do pulso de deslocamento e o ponto resultante da intersecção de duas retas ajustadas a partir do pulso;
- O método da NCHRP 285 (2004), que preconiza a obtenção de dois módulos: o Módulo Instantâneo (MI), relativo à parte elástica; e o módulo total (MT), que acrescenta a parcela de deslocamento recuperável ao longo do tempo.

2.3. Módulo Dinâmico

Para materiais não 100% resilientes, define-se rigidez como um número complexo E^* que engloba duas parcelas: os módulos E' e E'' . O módulo E' se refere à parte elástica, onde toda energia entregue é armazenada e devolvida em forma de deformação; e o módulo E'' , referente ao comportamento viscoso, toda a energia fornecida é dissipada. O MD nada mais é do que “o módulo do módulo complexo”, expresso pela equação 3:

$$E^* = E' + iE''; |E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2} \quad (3)$$

O ensaio de obtenção do MD consiste na aplicação de uma carga senoidal (carga harmônica) de amplitude σ_0 e frequência f (frequência angular ω) onde se mede a deformação produzida ao longo do tempo. Se o comportamento do material é viscoelástico, a resposta a uma

solicitação é senoidal, com magnitude máxima de deformação ε_0 e defasagem com relação à curva de tensão expressa pelo ângulo de fase δ . Esta resposta é ilustrada na Figura 3.

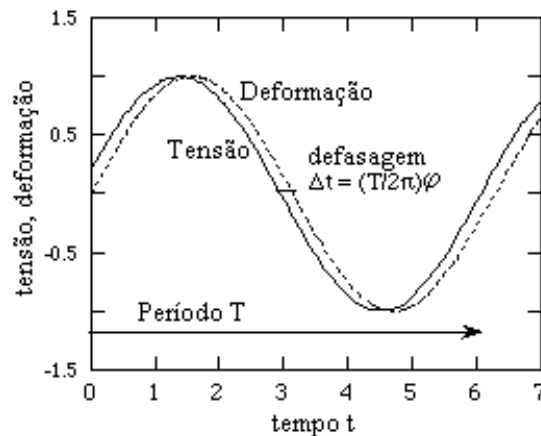


Figura 3: Resultado típico de ensaio de módulo dinâmico em materiais viscoelásticos

Matematicamente, representa-se a solicitação no ensaio conforme a equação 4. A deformação resultante é expressa pela equação 5:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \delta) \quad (5)$$

O MD é obtido em função de ε_0 , conforme a equação 6:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

Em Clyne *et al.* (2003), são citados alguns modelos no qual prevêem o valor do MD em função de características dos agregados e do ligante da mistura, como percentagens retidas em determinadas peneiras, viscosidade do ligante, índice de vazios da mistura, entre outras.

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 nesta pesquisa corpos-de-prova (CPs) de concreto asfáltico modificado com borracha (via úmida), cujo ligante asfáltico foi o Ecoflex B, comercializado pela Greca Asfaltos S.A. O teor de ligante foi 5,6%. Os agregados minerais utilizados, de natureza granítica, provindos da pedra Sargon (Santa Isabel – SP), têm sua distribuição granulométrica vista na figura 4.

A tabela 1 mostra os corpos-de-prova tomados para o trabalho, onde há três corpos de prova foram submetidos à carga cíclica igual a 15% da carga de ruptura e outros três com carga igual a 30% da carga ruptura obtido no ensaio de resistência à tração por compressão diametral (DNER-ME 138/94,1994), denominada de RT.

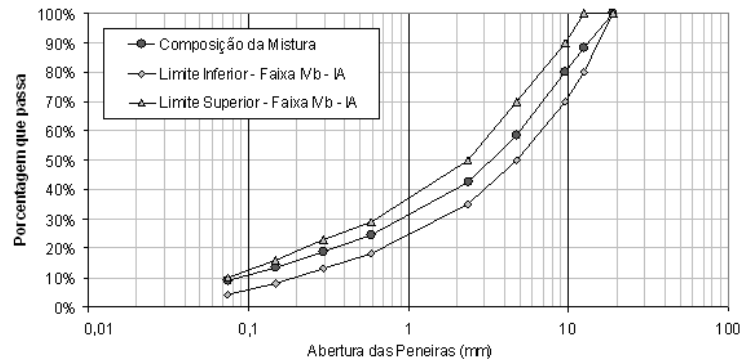


Figura 4: Curva granulométrica da mistura asfáltica ensaiada (Brito, 2006)

Tabela 1: Propriedades dos CPs ensaiados (adaptado de Brito, 2006)

Ensaio	CP	h(cm)	Índice de vazios (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
0,15P _{rupt}	3K	6,31	3,33	3,99	0,71
	6E	6,38	3,88		
	5I	6,46	4,75		
0,30P _{rupt}	4L	6,37	3,45	4,02	0,53
	5Q	6,40	4,09		
	3Q	6,43	4,50		

3.2. Aquisição de dados experimentais

Os dados experimentais foram obtidos seguindo-se os procedimentos da norma DNER-ME 133/94 (DNER, 1994), que descreveu o ensaio de MR em 2006. No LAPAV-UFRGS, utilizou-se um cilindro de pressão, onde 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 *Linear Variable Displacement Transducers* (LVDTs) preso ao corpo-de-prova. Amplifica-se o deslocamento com um condicionador de sinais, e estes são gravados em um sistema de aquisição de dados.

Brito (2006) executou ensaios com medição simultânea de deslocamentos verticais e horizontais, onde foram medidos deslocamentos entre os pontos extremos da metade central dos diâmetros horizontal e vertical. Utilizaram-se os resultados de ensaios feitos a 25°C.

4.OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS CONSTITUTIVOS

O estudo de correlação entre os parâmetros MR, MI, MT, MD, AF e da curva de fluência exigiu que estes fossem extraídos a partir dos dados experimentais ou obtidos numericamente. Os itens a seguir descreverão como cada um destes parâmetros foi adquirido.

4.1.Obtenção dos MRs, MIs e MTs

Para cada CP ensaiado à 15% da RT, obteve-se 15 pulsos de deslocamento horizontal e 15 pulsos de deslocamento vertical, totalizando 90 pulsos. Para os CPs ensaiados à 30% da RT, foram obtidos 20 pulsos em cada caso, totalizando 120 pulsos. No total, foram 210 pulsos analisados e divididos em 42 grupos de 5 ciclos. Para cada um destes grupos foram aplicados os procedimentos das normas descritas no item 2.2 para obtenção dos módulos em questão.

4.2.Obtenção da curva de fluência

A curva de fluência escolhida para o ajuste está expressa na equação 7:

$$D(t - \tau) = A + B(t - \tau)^m \quad (7)$$

onde “A”, “B” e “m” são os parâmetros a serem determinados, t é o tempo de carga no material e τ é o tempo de início de carga.

Esta curva de fluência foi escolhida devido ao fato de que para AFs até 50°, a constante “m” tem uma relação direta e linear com o mesmo, o que facilita a interpretação do mesmo ensaio. Variando-se ϕ na equação 5 ($\epsilon_0 = 1$) e substituindo-se as equações 7 e 4 na equação 1, obtiveram-se as equações necessárias para os ajustes, no qual a relação encontrada de “m” com o AF é expressa pela equação (8). Os valores de “A” nesses ajustes sempre foram nulos.

$$\delta(\text{graus}) = 90,434m - 0,0354 \approx 90m \quad (8)$$

($R^2 = 1$)

Adotar a curva de fluência vista na equação 7 exige ter em mente que, para “A” nulo, quanto maior o tempo de carga, maior será “m”. Esta diferença é vista em alguns trabalhos que utilizam a curva: Theisen *et al.* (2009) obtiveram um valor de “m” de 0,3638 considerando ensaios de módulo de resiliência com tempo de carga de 0,2 s. Lee *et al.* (2003) encontraram valores variando entre 0,39 a 0,67 para ensaios de fluência (longo tempo de carga). Todos os referidos ensaios foram feitos a 25°C. Recomenda-se ao adotar a curva de fluência vista na equação 7 que sua aplicação se restrinja a ensaios cujo tempo de carga seja semelhante.

Para determinar o comportamento do material sob compressão diametral cíclica, foi preciso aplicar o PCEV. Desta maneira, as soluções elásticas para deslocamento horizontal e vertical entre os pontos medidos são expressas pelas equações 9 e 10, respectivamente:

$$u_{hor}(t) = \frac{P(t)}{Eh} (0,2339 + 0,7801\nu) \quad (9)$$

$$u_{ver}(t) = \frac{P(t)}{Eh} (1,06949 + 0,3074\nu) \quad (10)$$

onde P(t) é o pulso de carga em função do tempo; E é o módulo de elasticidade; h é a espessura do CP e ν é o coeficiente de Poisson, aqui considerado constante e igual a 0,3.

Os pulsos de carga receberam eliminação de ruídos e após ajustados com polinômios de quarta ordem, visto na equação 11, obtendo-se bons ajustes ($R > 0,99$).

$$P(t) = \sum_{i=0}^4 c_i t^i \quad (11)$$

Aplicando-se o PCEV nas equações 9 e 10, para isto utilizando-se as equações 7 e 11, o comportamento carga deslocamento para o ensaio de MR é expresso pelas equações 12 e 13:

$$u_{hor}(t) = \frac{0,2339 + 0,7801\nu}{h} \left[AP(t) + B \left(c_0 t^m + \sum_{i=1}^4 \frac{i! c_i t^{m+i}}{\prod_{j=1}^i m+j} \right) \right] \quad (12)$$

$$u_{ver}(t) = \frac{1,0694 + 0,3074\nu}{h} \left[AP(t) + B \left(c_0 t^m + \sum_{i=1}^4 \frac{i! c_i t^{m+i}}{\prod_{j=1}^i m+j} \right) \right] \quad (13)$$

As duas equações acima são válidas para o intervalo de tempo sob carga, ou seja, entre 0 e 0,1 s. Para os 0,9 s restantes do ciclo, é válida a equação 14:

$$u_{hor/ver}(t) = u_{hor/ver}(t = 0,1s)(t - 0,1s + 1)^{\frac{1}{m}} \quad (14)$$

Poucos grupos não tiveram “A” nulo, fato ocorrido onde o tempo de pico de deslocamento foi menor que 0,06 s, próximos do tempo de pico de carga (0,48 s). Tal fato é coerente, indicando maior influência da parcela elástica nos deslocamentos, fazendo os picos de carga e deslocamento mais próximos. A Figura 5(a) mostra a relação entre o tempo de pico de deslocamento e “A”. Também se notou que “A” é presente nos ajustes com maiores valores de “m”, isto porque quanto maior “m”, menor é a magnitude da parcela viscoelástica nos deslocamentos (“B” fixo), aumentando a influência da parcela elástica no trecho carregado. A Figura 5(b) mostra a relação entre “m” e “A”:

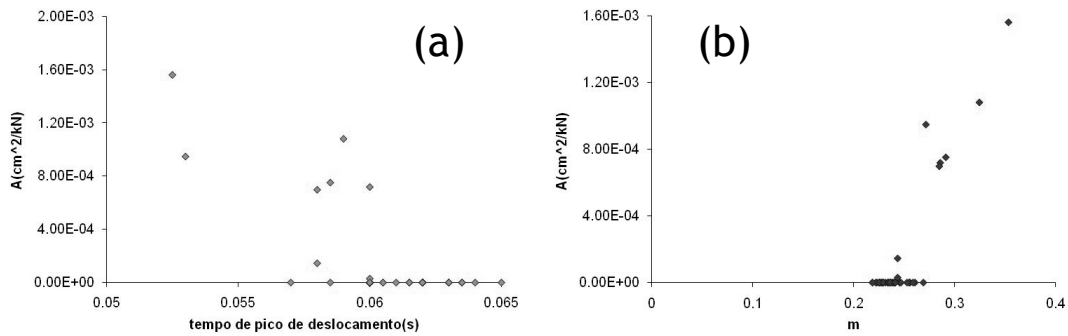


Figura 5: Parâmetro “A” em função de (a) tempo de pico de deslocamento e (b) m

4.3. Obtenção dos Módulos Dinâmicos

Substituindo-se as equações 7 e 4 na equação 1, obtém-se a equação 15:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(A \sin(2\pi f t) + 2\pi f B \int_{\tau=0}^t \cos(2\pi f \tau) (t - \tau)^m d\tau \right) \quad (15)$$

Utilizando-se os parâmetros “A”, “B” e “m” encontrados, fazendo-se σ_0 igual à 1, variando-se f de 0,01 a 25 Hz e aplicando-se as equações do item 2.3, são obtidos os MDs e os AFs.

5. CORRELAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS

5.1. Correlações genéricas

Para averiguação de quais variáveis teriam maior correlação para avanço no desenvolvimento dos modelos, correlacionou-se duas variáveis extraídas do ensaio de MR com uma extraída do ensaio de MD, utilizando-se para tal a equação 16:

$$VMD(1Hz) = \alpha * V1MR + \beta * V2MR + \gamma \quad (16)$$

onde $V1MD(1Hz)$ é uma variável dos resultados numéricos de ensaios de MD a 1 Hz; $V1MR$ e $V2MR$ são variáveis dos resultados experimentais dos ensaios de MR e α, β, γ são coeficientes. A tabela 2 mostra as variáveis utilizadas e os R^2 encontrados nos ajustes.

Tabela 2: Coeficientes de Determinação para ajustes de MD em função de MR

V1MR	V2MR	VMD1Hz	R^2	V1MR	V2MR	VMD1Hz	R^2
MR	tpicodesloc	MD1Hz	0,9746	MI	MT/MI	MD1Hz	0,9776
MR	tpicodesloc	AF1Hz	0,7206	MI	MT/MI	AF1Hz	0,4892
MI	MT	MD1Hz	0,9748	MI	tpicodesloc	MD1Hz	0,9580
MI	MT	AF1Hz	0,4520	MI	tpicodesloc	AF1Hz	0,6718

A Tabela 2 mostra que os melhores ajustes envolvem como $V1MD(1Hz)$ o MD extraído a 1 Hz, onde o maior R^2 foi para o ajuste em função de MI e a relação MT/MI, atingindo o valor de 0,9776. Na mesma tabela, notam-se ajustes ruins se $V1MD(1Hz)$ for o AF extraído a 1 Hz, onde R^2 não passa de 0,7206. Isto preconiza que há uma boa correlação entre rigidezes dos ensaios e não de parâmetros que representem o grau de viscoelasticidade do material.

Entretanto, executando-se uma correlação linear entre o parâmetro “m” e o AF extraído a 1 Hz, notou-se uma excelente correlação, com $R^2=0,9989$. Assim, pensou-se em se extrair o parâmetro “m” diretamente em função dos dados fornecidos pelo ensaio de módulo, buscando-se uma boa correlação entre AFs também, não só entre rigidezes.

5.2. Correlações entre picos de deslocamento/carga e AFs

Para representar o parâmetro “m” extraído diretamente dos dados fornecidos nos ensaios de MR, adotou-se um parâmetro “mex”, expresso pela equação 17:

$$mex = \frac{t_{picodeslocamento} - t_{picocarreg}}{t_{fimcarreg} - t_{picocarreg}} \quad (17)$$

Infelizmente não há um bom ajuste de “m” em função de “mex”, devido ao baixo R^2 , (0,4410). Neste sentido, foi tentado o ajuste dos AFs das frequências ensaiadas numericamente em função de “m”, onde excelentes ajustes lineares foram obtidos, tal como visto na figura 6. Porém, o que foi notado foi o crescimento do AF em função da frequência, fato que em qualquer pesquisa que obtém experimentalmente AF não acontece, pois nestas o AF cai com a frequência, para uma mesma temperatura.

É difícil estabelecer uma relação entre parâmetros de curva de fluência e o AF. Theisen *et al.* (2007), utilizando parâmetros de curva de fluência baseada em séries de Prony, não conseguiram modelar a variação do AF com f. Loulizi *et al.* (2006) constatarem experimentalmente o comportamento complexo do ângulo de fase, sobretudo para temperaturas maiores que 30°C, não encontrando relação com o módulo de resiliência das misturas ensaiadas. Em suma, modelos analíticos restringem-se apenas à previsão dos MDs.

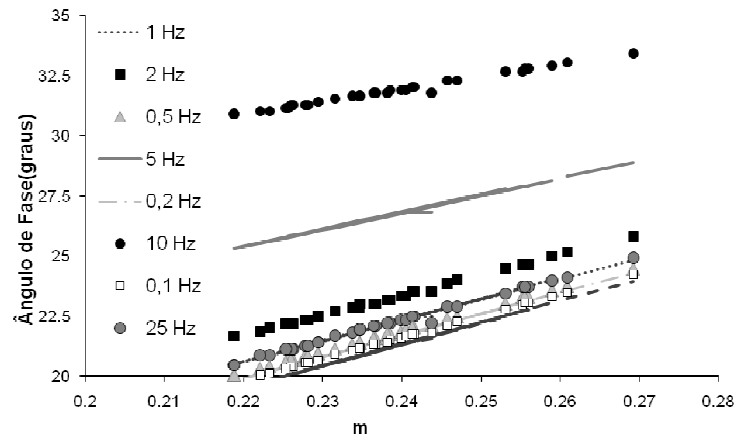


Figura 6: Ângulos de Fase em função de m

5.3. Correlações entre MRs e MDs

Em função de MR e MI, os MDs à várias frequências, obtidos numericamente, foram ajustados, obtendo-se bons R^2 (entre 0,8741 a 0,9746). Loulizi *et al.* (2006) chegaram a mesma constatação, comparando MRs de dadas misturas com o MD das mesmas misturas a 5 Hz. A figura 7 mostra os ajustes dos MDs em função de MR:

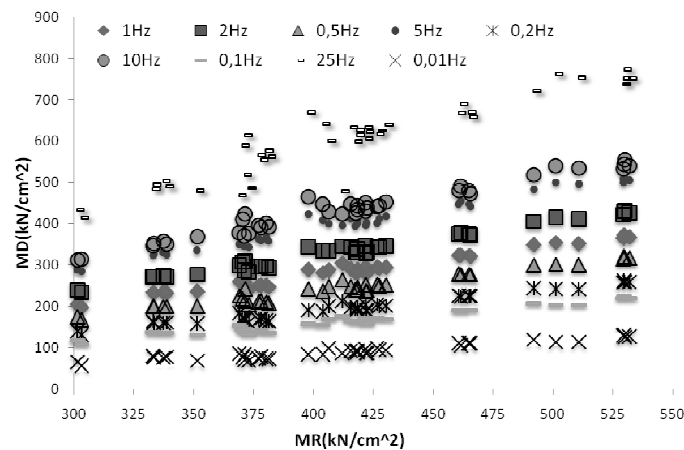


Figura 7: Módulos Dinâmicos em função de MR

Com frequências próximas a 1 Hz, os ajustes foram mais precisos, tanto em função de MR como de MI. A tabela 3 mostra os R^2 de cada um dos ajustes em função de MR, MI e da frequência. Nesta figura, se vê que melhores ajustes são em função de MR com frequências menores que 4 Hz; e melhores ajustes em função de MI caso contrário:

Tabela 3: Coeficientes R^2 em Função de MR e MI

freqüência(Hz)	0,01	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	25
R^2 (ajuste MR)	0,9149	0,9523	0,9596	0,9589	0,9746	0,9769	0,9690	0,9589	0,8741
R^2 (ajuste MI)	0,8914	0,9226	0,9308	0,9391	0,9563	0,967	0,9718	0,9672	0,9151

Com os coeficientes lineares e angulares dos ajustes da figura 7, pesquisou-se como estes variaram em função de f. Para tal, normalizou-se os coeficientes lineares/angulars obtidos, dividindo-os pelo coeficiente linear/angular do ajuste à 1 Hz. Para os coeficientes angulares normalizados, notou-se uma variação potencial em função da frequência, com $R^2 > 0,9918$; no

caso dos coeficientes lineares normalizados, a variação foi parabólica, com $R^2 > 0,9552$. As figuras 8(a) e 8(b) mostram, respectivamente, os ajustes em função de MR e MI:

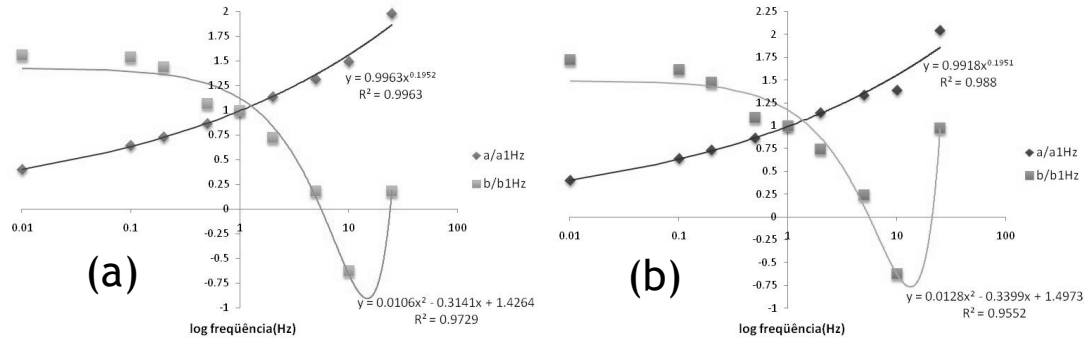


Figura 8: Coeficientes normalizados em função da f para ajustes com (a) MR e (b) MI

Desta forma, os MD em função de f podem ser calculados em função de MR e MI de acordo com as equações 18 e 19, respectivamente (MR, MI e MD em kN/cm^2 e f em Hz):

$$|E^*|(f, MR) = 0,7402(0,9963f^{0,1952})MR - 21,302(0,0106f^2 - 0,3141f + 1,4264) \quad (18)$$

$$|E^*|(f, MI) = 0,534(0,9918f^{0,1951})MI - 18,459(0,0128f^2 - 0,3399f + 1,4973) \quad (19)$$

6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

A luz das descobertas da presente pesquisa, os autores têm as seguintes conclusões:

- Notou-se uma boa correlação direta e linear entre os AF extraídos a 1 Hz e “m”, válidas para “A” nulo. Sendo assim, é possível ao menos extrair do ensaio de MR o AF da mistura à frequência de 1 Hz, pois para outras frequências, mesmo notando-se excelentes ajustes lineares, a modelagem não descreve o comportamento visto experimentalmente para o AF, que é a sua queda com o crescimento da frequência;
- Correlacionando-se dados obtidos no ensaio de MR com o ensaio de MD a 1 Hz, notou-se que as melhores correlações são baseadas nos parâmetros de rigidez, especialmente se tratando da relação MI, MT/MT com o MD a 1 Hz. No caso do AF, as correlações não foram satisfatórias, onde concluí-se que para o material estudado, parâmetros obtidos no ensaio de MR não têm correlação com o AF;
- Correlacionando-se parâmetros de Rigidez (função de MR e MI), obteve-se boa correlação entre os estes parâmetros e os MDs para frequências entre 0,01 e 25 Hz. Para frequências maiores que 4 Hz, melhores ajuste são em função de MI.

Obviamente os modelos deste trabalho são válidos para um intervalo pequeno de MRs, MIs e MDs, e para o material estudado. Entretanto, entende-se que se avançou descoberta da relação entre os ensaios citados neste trabalho, sugerindo-se como pesquisas futuras:

- A validação das relações obtidas neste trabalho, ensaiando-se diferentes materiais, no qual irá abranger um intervalo maior de módulos e uma variedade maior de materiais;
- A validação experimental dos resultados obtidos numericamente neste trabalho, executando-se ensaios de MD com os materiais aqui pesquisados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Doutorando Lélío Brito por ceder os dados dos ensaios de módulo de resiliência e assim possibilitar a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (1995). *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*. ASTM D4123-82. 4p.
- 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.
- CARNEIRO, F.L. (1943) *Um Novo Método para Determinação de Resistência a Tração dos Concretos*. Comunicação 5, Reunião ABNT, Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro.
- CLYNE T. R., LI X., MARASTEANU M. O., SKOK E. L. (2003) *Dynamic and Resilient Modulus of Mn/DOT Asphalt Mixtures*. Department of Transportation of Minnesota, United States, 78p.
- 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.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1994). *Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência*. DNER 138/94. 5p.
- 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.
- 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.
- HONDROS, G. (1959) *The Evaluation of Poisson's Ratio and the Modulus of Materials of a Low Tensile Resistance by the Brazilian (indirect tensile) Test with Particular Reference to Concrete*. Australian Journal of Applied Science. V.10(3) p.243-268.
- 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.
- LEE, H.J.; KIM, Y.R.; LEE, S.W. 2003. *Fatigue life prediction of asphalt mixes using viscoelastic material properties*. 83th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- LOULIZI, A.; FLINTSCH, G.W.; AL-QADI, I.L.; MOKAREM, D. (2006). *Comparing Resilient Modulus and Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt as Material Properties for Flexible Pavement Design*. Transportation Research Record, n.1970, Washington, DC, pp. 161-170.
- 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.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (2004) *Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design*. NCHRP 285 (Project 1-28A).
- PAPAZIAN, H. S. (1962) *The Response of Linear Viscoelastic Materials in the Frequency Domain with Emphasis on Asphaltic Concrete*, (1st) International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 454-463.
- 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.
- THEISEN, K.M.; NÚÑEZ, 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*. Publicado nos anais do XXI ANPET– Rio de Janeiro;
- THEISEN, K.M.; VICTORINO, D.R.; NÚÑEZ, W.P.; CERATTI, J.A.P (2009). *Using the Viscoelasticity and Continuum Damage Theories to Quantify the Effects of Loading Speed in Accelerated Pavement Testing Results*. 8th Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, pp.1393-1404.
- 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.