

MÓDULO COMPLEXO DE AMOSTRAS DE CONCRETOS ASFÁLTICOS EXTRAÍDOS E NÃO EXTRAÍDOS OBTIDO POR DOIS HISTÓRICOS DE CARREGAMENTO: COMPRESSÃO E TRAÇÃO-COMPRESSÃO

Gustavo dos Santos Pinheiro

Departamento de Engenharia de Transportes
Universidade de São Paulo

Luciano Pivoto Specht

Departamento de Transportes
Universidade Federal de Santa Maria

Cléber Faccin

Centro de Ensino Superior Riograndense

Pablo Menezes Vestena

Departamento de Transportes
Universidade Federal de Santa Maria

Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopolus

Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil
Universidade Federal do Ceará

Deividi da Silva Pereira

Departamento de Transportes
Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO

O módulo complexo é um dos ensaios para avaliação da resposta fundamental tensão-deformação dos concretos asfálticos, que pode ser modelada pelo modelo 2S2P1D. O carregamento utilizado afeta medidas obtidas de propriedades viscoelásticas das misturas, ainda fatores relacionados à distribuição das partículas dos agregados e seus vazios de ar afetam sua rigidez. Propôs-se avaliar o módulo complexo para diferentes materiais – com amostras extraídas e não extraídas – incluindo investigação do efeito de variações no carregamento do ensaio. Constatou-se que a modelagem 2S2P1D se mostrou adequada para avaliação do comportamento reológico dos ensaios à compressão de amostras extraídas, fato que não ocorreu à tração-compressão. Destaca-se a consequência da extração sobre o volume de vazios, que influenciou nas respostas mecânicas dos materiais, sendo estas maiores que o fato de se trabalhar com compressão ou tração-compressão. Para casos práticos de uso dos valores de módulo complexo, amostras moldadas e ensaiadas à compressão parecem ser suficientes.

ABSTRACT

One of the tests used to evaluate the fundamental stress-strain response of asphalt concretes is the complex modulus test, which can be modeled using the 2S2P1D model. The utilized loading path affects the obtained measurements of their viscoelastic properties, besides factors related to the aggregate's particles distribution and their air voids affects the material's stiffness. It is proposed to evaluate the complex modulus of different materials – with cored and non-cored specimens – including an investigation of the effect of variations in the complex modulus test's loading path. It was found that the 2S2P1D modeling is adequate for the evaluation of mixtures' rheological behavior for tests conducted in compression condition for cored samples, fact that did not occur in tension-compression tests. It is also highlighted the consequence of the extraction on air voids content, that influenced the materials' mechanical responses, that is more relevant than the fact of using compression or tension-compression loads. For practical cases using complex modulus values, molded samples and tested in compression condition seem to be sufficient.

1. INTRODUÇÃO

Através da superposição de diferentes camadas, constituídas por uma diversidade de materiais e com variações de suas espessuras, o pavimento tem como um dos principais objetivos resistir aos esforços gerados pela passagem dos veículos. Dentre essas camadas, está o revestimento asfáltico que, por se localizar na superfície da estrutura, receberá diretamente as aplicações das cargas e deverá transmiti-las de maneira atenuada às camadas subjacentes. As cargas dinâmicas aplicadas sobre o pavimento geram certo estado de tensões no concreto

asfáltico que varia em função do seu comportamento, e essas tensões e deformações produzidas estão relacionadas aos principais defeitos encontrados em pavimentos, como o trincamento por fadiga e a deformação permanente, comuns no Brasil. Por isso, sublinha-se a importância de se conhecer a rigidez das misturas asfálticas, uma vez que um projeto de pavimentação adequado deva proporcionar uma resposta do conjunto estrutural condizente às solicitações do tráfego, o que definirá a vida útil da estrutura (Bernucci *et al.*, 2010).

É sabido da possibilidade de se avaliarem as propriedades mecânicas dos concretos asfálticos a partir de ensaios de laboratório. No Brasil, por exemplo, o parâmetro de rigidez mais utilizado é o Módulo de Resiliência (MR), que, apesar de ser um ensaio de simples execução, desconsidera o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas. Em contrapartida, outro ensaio vem sendo empregado no âmbito acadêmico nacional, o módulo complexo (E^*), já praticado por diferentes países e que melhor representa esse comportamento. O ensaio de módulo complexo consiste em aplicações de cargas senoidais cíclicas no material, e a obtenção do módulo complexo é feita comparando-se os sinais de tensão e de deformação obtidos. A norma americana mais empregada no Brasil (AASHTO T 342-11) utiliza um ensaio de compressão uniaxial sobre o corpo de prova (CP) com diferentes combinações de frequência e temperatura. Outros ensaios e configurações são possíveis, como indica a norma europeia EN 12697-26 para a determinação do módulo de misturas asfálticas, a qual considera diferentes geometrias de corpo de prova e tipos de carregamento, inclusive ensaios de mais difícil execução, mas que em tese produziriam melhores resultados, como o de tração-compressão. Estudos prévios, como os realizados por Kallas (1970), Di Benedetto *et al.* (2004) e Wu *et al.* (2012), relatam que o modo de carregamento tem um efeito significativo nas propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas e que, além disso, quando conduzidos à tração-compressão, os ensaios podem ser mais representativos ao comportamento em campo. Fatores como distribuição das partículas e conseqüentemente de seus vazios também têm um efeito sobre a rigidez de concretos asfálticos e seu coeficiente de Poisson. Kim (2009) afirma que, tal como acontece com as partículas finas, os vazios de ar devem ser pequenos e bem dispersos para ter um efeito satisfatório na rigidez da mistura, com uma melhor distribuição das tensões geradas no material, condição essa que pode ter influência ao se trabalhar com concretos asfálticos provenientes de uma extração (*cored specimens*).

Nota-se, portanto, a importância da investigação dos efeitos que ensaios realizados com diferentes históricos de carregamento têm sobre as propriedades viscoelásticas das misturas, bem como avaliar o comportamento de amostras de concreto asfáltico extraídas e não extraídas. Partindo dessa premissa, este estudo se propõe a avaliar essas propriedades para diferentes concretos asfálticos através de variações no carregamento do ensaio de módulo complexo, utilizando carregamentos de compressão e de tração-compressão uniaxial. Verifica-se, desse modo, a influência sobre a rigidez do material ao se trabalhar com amostras não extraídas e extraídas em laboratório.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

São apresentados, neste item, as características das misturas utilizadas no trabalho; parâmetros; preparo das amostras; e os métodos de ensaio empregados, a fim de avaliar o comportamento dos concretos asfálticos quanto à rigidez.

2.1. Materiais utilizados

Foram utilizadas 3 misturas asfálticas densas, compostas por diferentes ligantes asfálticos e

faixas granulométricas. A primeira mistura, denominada U3-DAER-FXB-ECO, é composta por um asfalto modificado por borracha, ECOFLEX AB-8, e de esqueleto pétreo enquadrado na Faixa B do DAER-RS. A segunda é constituída por um CAP 50/70 e granulometria seguindo a Faixa C do DNIT, nomeada U10-DNIT-FXC-50/70. Já, a terceira mistura estudada é composta por um asfalto modificado por polímero, AMP 60-85, e faixa granulométrica enquadrada na Faixa C do DAER-RS, de nomenclatura U12-DAER-FXC-60/85. As DMMs (Densidades Máximas Medidas) obtidas para as misturas U3, U10 e U12, respectivamente, foram: 2,348; 2,597; e 2,719. Esses valores, em vez de densidades máximas teóricas (recomendadas pelo DAER-RS) foram utilizados nessa pesquisa para o cálculo da massa asfáltica necessária para confecção das amostras, conforme Faccin (2018).

2.2. Compactação e extração das amostras

As amostras utilizadas nesta pesquisa foram misturadas e moldadas no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) com 150 mm de diâmetro e 160 mm de altura, conforme Figura 1a. Os parâmetros de compactação foram: aplicação de pressão de 600 kPa, velocidade constante de 30 rpm e ângulo de rotação externo de 1,25°, a fim atingir o Volume de vazios (Vv) de 5,5% \pm 0,5%, requerido para o ensaio de módulo complexo. Após compactação, as amostras, como ilustra a Figura 1b, foram sujeitas a pesagens ao ar, hidrostática (3 min.) e de superfície seca para verificação do Vv. Na Figura 1c, são apresentados os corpos de prova menores, com 100 mm de diâmetro, que foram extraídos das amostras de 150 mm de diâmetro por meio de uma extratora rotativa com motor à gasolina.

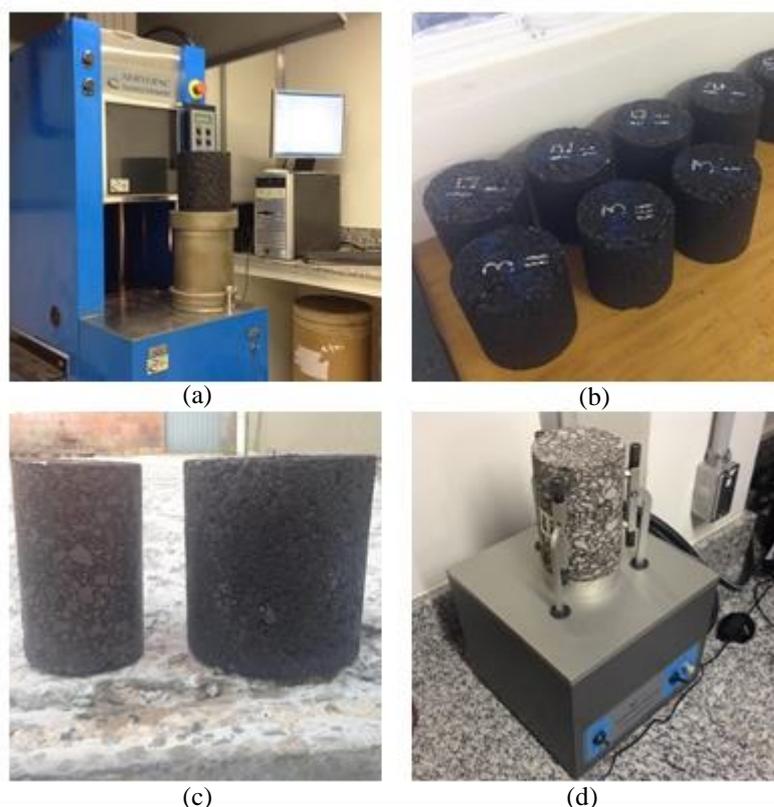


Figura 1: (a) CGS após compactação; (b) amostras prontas para pesagem; (c) amostras antes (cilindro da direita) e após (cilindro da esquerda) a extração; (d) corpo de prova retificado tendo os acessórios de ensaio colados

Posteriormente à extração, os corpos de prova tiveram suas faces cortadas e retificadas igualmente, para obterem um melhor paralelismo entre as extremidades e até atingirem a altura estipulada de ensaio, a ver na Figura 1d. Essa etapa é de grande importância, já que melhor distribui as tensões durante a execução dos ensaios, tanto de módulo complexo à compressão quanto à tração-compressão uniaxial.

Para cada uma das misturas foram confeccionados 3 corpos de prova com altura de 150 mm, todos submetidos ao ensaio de módulo complexo por compressão. Desses, pares de amostras de cada mistura que apresentaram menores dispersões nos resultados foram retificados até a altura de 130 mm, em conformidade com a norma AASHTO TP 107-18, e submetidos ao ensaio de módulo complexo por tração-compressão uniaxial, totalizando 6 corpos de prova para a nova condição de carregamento, em razão do número de peças disponíveis para a execução do ensaio à tração-compressão.

2.3. Ensaio de módulo complexo

O ensaio de módulo complexo foi realizado conforme prescrições da norma AASHTO T 342-11, com corpos de prova de dimensões variando de 100 a 104 mm de diâmetro e 147,5 a 152,5 mm de altura. Para cada mistura estudada na pesquisa, foram ensaiados 3 corpos de prova, totalizando 9 amostras, submetidas a aplicações de carga compressiva nas frequências de 25Hz, 20Hz, 10Hz, 5Hz, 2Hz, 1Hz, 0,5Hz, 0,2Hz, 0,1Hz e 0,01Hz, para cada uma das temperaturas de -10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C. Por recomendação da norma, os ensaios foram iniciados sempre das menores até as maiores temperaturas, bem como das mais altas frequências até as mais baixas.

A execução do ensaio consiste em aplicações de cargas senoidais cíclicas por compressão uniaxial sobre o corpo de prova. A resposta do sinal de tensão aplicada e do de deformação axial resultante da amostra para cada ciclo é medida e usada para calcular o módulo dinâmico ($|E^*|$) e o ângulo de fase (δ). Por norma, a amplitude de carga deve ser ajustada para obter valores de amplitude (de pico a vale) de deformação axial entre 50 e 150 $\mu\epsilon$. Entretanto, para essa pesquisa, a carga dinâmica foi ajustada a fim de obter valores de deformações axiais entre 50 e 75 $\mu\epsilon$ para representar melhor o regime viscoelástico linear do material (UNDERWOOD, 2011).

2.3. Módulo complexo à tração-compressão

O ensaio de módulo complexo foi repetido para 2 corpos de prova de cada uma das misturas, totalizando 6 amostras, as quais foram testadas nas mesmas condições de frequência (de 25 a 0,01Hz) e temperatura (de -10 a 54°C) anteriormente definidas, porém conduzido sob forma de tração-compressão uniaxial, e não mais por compressão uniaxial. Para isso, os aparatos convencionais de ensaio foram substituídos por um sistema que permitisse a aplicação desse tipo de carregamento na amostra.

Além, para o monitoramento do ensaio, aceitou-se uma variação de deformação axial de 50 a 150 $\mu\epsilon$, não mais 50 a 75 $\mu\epsilon$, como no ensaio por compressão. Dado o fato de as tensões serem escolhidas manualmente para cada uma das frequências, sem a garantia de que a taxas de deformações se mantenham nesses níveis.

2.4. Modelo viscoelástico 2S2P1D

O modelo análogo 2S2P1D (*Two Strings, Two Parabolic Elements and One Dashpot*),

desenvolvido por Olard e Di Benedetto (2003), consiste na associação de uma mola em paralelo a um conjunto de uma mola, um amortecedor linear e dois amortecedores parabólicos, ligados em série, conforme Figura 2. A Equação 1 representa o módulo complexo (E^*) obtido com o modelo 2S2P1D. O E^* pode ser decomposto em parte real (E_1) e parte imaginária (E_2), ou ainda em valor absoluto ($|E^*|$, conhecido na literatura como módulo dinâmico) e ângulo de fase (δ).

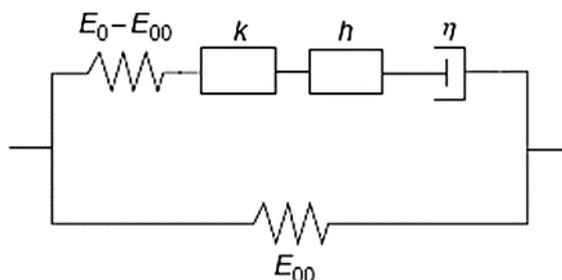


Figura 2: Representação do modelo análogo 2S2P1D

$$E^*(i\omega\tau) = E_{\infty} + \frac{E_0 - E_{\infty}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (1)$$

- em que
- E_{00} : módulo de elasticidade estático ($\omega \rightarrow 0$);
 - E_0 : módulo vítreo ($\omega \rightarrow \infty$);
 - δ : constante;
 - ω : pulsação = $2\pi f$, sendo f = frequência;
 - k, h : expoentes ($0 < k < h < 1$), β = constante;
 - η : viscosidade Newtoniana, $\eta = (E_0 - E_{00})$; e
 - τ : tempo característico, cujo valor varia apenas com a temperatura.

A lei utilizada para descrever as funções de translação se baseia no princípio de superposição tempo-temperatura, determinada por Williams *et al.* (1955), a fim de capturar a mudança no comportamento em função da temperatura. O “fator de deslocamento”, ou *shift factor*, é dado pelo coeficiente a_T e definido pela equação WLF (Williams, Landel e Ferry), em função da curva primitiva de ensaio (T) e da isoterma que se pretende formar a partir da translação. Esse fator é expresso pela Equação 2 utilizando as duas constantes positivas C_1 e C_2 , as quais são dependentes do material e calculadas a partir da temperatura de referência (T_{ref}).

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (2)$$

Diferentes representações gráficas são usadas para mostrar a variação do módulo complexo com frequência e temperatura. Os tipos mais comuns de plotagem são: o plano Cole-Cole e o diagrama Black, além das curvas mestras de $|E^*|$ e δ . A primeira é obtida pela plotagem dos valores E_1 e E_2 no plano complexo (parte imaginária em função da parte real). Como os eixos são comumente em escala linear, a grande variação de E_1 e E_2 não é totalmente evidente. Em particular, os gráficos de Cole-Cole são úteis para realçar o comportamento de materiais betuminosos a baixas temperaturas e altas frequências. Já o diagrama Black é obtido através da plotagem dos valores de $|E^*|$ em relação aos valores de φ correspondentes. É geralmente plotado em uma escala semi-logarítmica (\log de $|E^*|$ versus δ). Estes diagramas são úteis para destacar o comportamento do material betuminoso a altas temperaturas e baixas frequências.

Optou-se, para este trabalho, por apresentar e analisar os resultados a partir das curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise dos parâmetros volumétricos

Na Tabela 1 são dados os volumes de vazios (V_v) para cada uma das amostras, medindo 150 mm de diâmetro e 160 mm de altura, confeccionadas para as diferentes misturas estudadas nessa pesquisa. Também são fornecidos os valores do V_v das amostras já extraídas e retificadas, apresentando tamanho para ensaio de 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura e a variação do V_v sofrida por amostra.

Tabela 1: Parâmetros volumétricos das amostras antes e depois da extração

Mistura	CP	V_v anterior à extração (%)	V_v após extração (%)	Varição do V_v
U3-DAER-FXB-ECO	1	5,91	5,33	-10%
	2	6,28	5,61	-11%
	3	6,28	5,66	-10%
U10-DNIT-FXC-50/70	1	5,59	5,01	-11%
	2	5,80	5,21	-10%
	3	5,76	5,20	-10%
U12-DAER-FXC-60/85	1	5,72	5,03	-12%
	2	5,55	5,26	-5%
	3	5,70	5,28	-7%

Observa-se que para todas as amostras o V_v variou para menos com a extração da amostra. Em média essa diminuição foi de 10,3% para as misturas U3-DAER-FXB-ECO e U10-DNIT-FXC-50/70, e de 8% para a mistura U12-DAER-FXC-60/85. No geral essa redução do V_v foi de 9,55%. Esse fato pode ser explicado pela heterogeneidade de vazios do material quando compactado, uma vez que o núcleo das amostras compactadas é retirado, seu entorno, que continha a maior parcela de vazios, deixa de fazer parte da estrutura. Visualmente é possível perceber esse aspecto, como ilustra a Figura 3. Entretanto, ressalva-se que uma das maneiras de se verificar com real precisão a distribuição de vazios de um material se dá pelo uso de métodos de tomografia computadorizada e de imagens digitais (NASCIMENTO *et al.*, 2006).

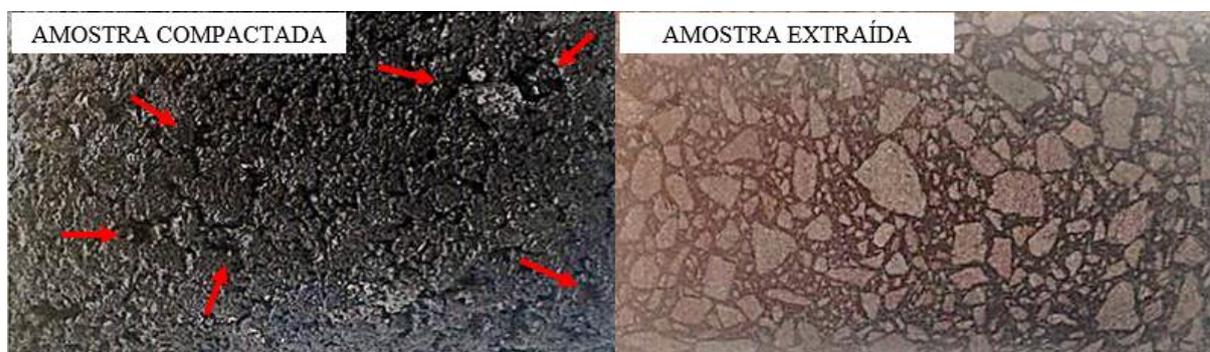


Figura 3: Fotografia aproximada da superfície do material antes e após extração

Foi comparado também o V_v dos corpos de prova não extraídos, ensaiados por Faccin (2018), com o V_v das amostras extraídas. Para a mistura U3-DAER-FXB-ECO e U12-DAER-FXC-

60/85, o V_v das amostras extraídas é em média 4 a 5% menor que os corpos de prova moldados sem alteração. Já para a mistura U10-DNIT-FXC-50/70, os corpos de prova extraídos apresentaram valores de V_v em média entre 13 e 17% mais baixos que os moldados por Faccin (2018), e essa diferença do V_v pode ser de até 1%.

3.2. Ensaios de módulo complexo

A seguir, são apresentadas as curvas mestras geradas a partir dos resultados de $|E^*|$ e δ , e ajustadas através do modelo reológico 2S2P1D para a temperatura de referência de 21°C, juntamente com seus respectivos dados experimentais. Uma ressalva deve ser feita quanto à nomenclatura utilizada no trabalho, as misturas U3-DAER-FXB-ECO, U10-DNIT-FXC-50/70 e U12-DAER-FXC-60/85, são representadas respectivamente por: U3, U10 e U12 para os ensaios de módulo complexo conduzidos à compressão por Faccin (2018) em amostras compactadas que não passaram pelo processo de extração; U3-CORE-C, U10-CORE-C e U12-CORE-C, ensaios a compressão em corpos de prova extraídos; e U3-CORE-TC, U10-CORE-TC e U12-CORE-TC, ensaios a tração-compressão com corpos de prova também extraídos.

Constam nas Figuras 4, 5 e 6, as curvas mestras do $|E^*|$ e do δ para as diferentes misturas e condições de ensaio. As elevadas frequências, em que se encontram os maiores módulos, estão relacionadas às baixas temperaturas e às deformações elásticas, já as baixas frequências estão relacionadas a ocorrência de deformações viscoelásticas e de altas temperaturas, enquanto as temperaturas intermediárias podem ser relacionadas ao dano por fadiga do material.

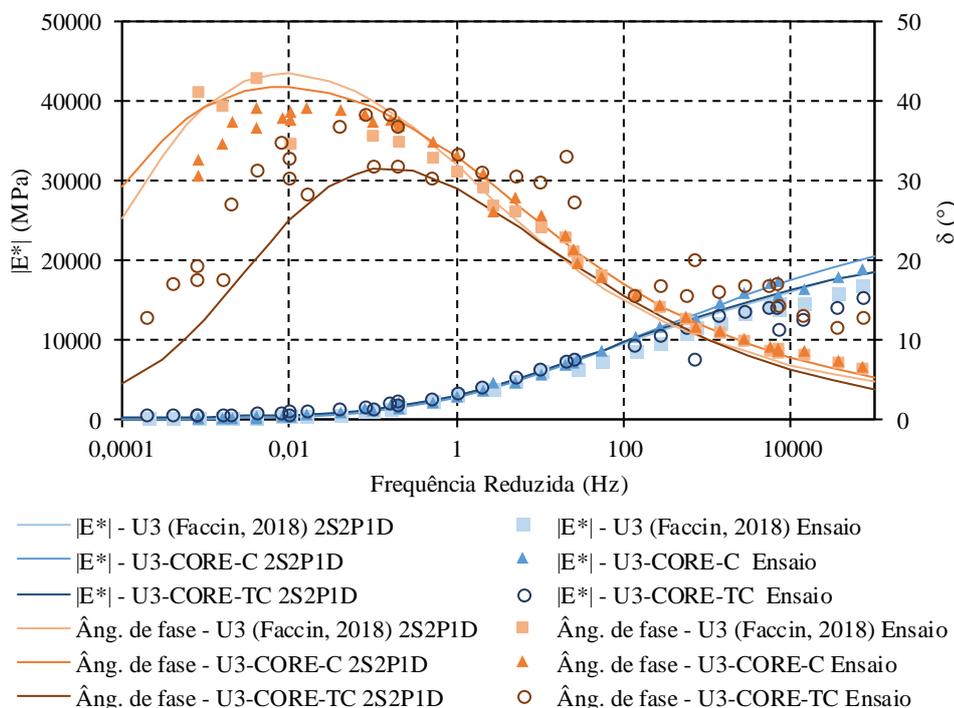


Figura 4: Curvas mestras do módulo dinâmico @ 21°C de U3

Para a mistura asfáltica modificada por borracha, na Figura 4, pode-se observar que os valores de módulo no alcance das maiores frequências tendem a ser maiores para a amostra extraída

pelo ensaio conduzido à compressão, o que caracteriza uma maior rigidez do material. Ainda assim, para as três condições avaliadas, os dados de módulo são similares, principalmente a frequências menores que 100Hz. Quanto ao ângulo de fase, a diferença nos dados de ensaio se torna mais aparente para o carregamento submetido à tração-compressão, principalmente a frequências abaixo de 1Hz, o que caracteriza um comportamento mais próximo ao regime elástico, em função de seus valores de δ serem menores quando comparados aos obtidos pelo ensaio de módulo dinâmico à compressão. Entretanto, as medidas de δ são dispersas com a mudança das frequências em comparação às demais condições analisadas. Tais variações serão discutidas posteriormente.

A partir das curvas mestras da Figura 5, observa-se a mesma tendência da mistura analisada anteriormente, em que os maiores valores de módulo, para frequências mais elevadas, são expressos pela condição de amostra extraída submetida ao ensaio à compressão. Porém, a desigualdade das rigidezes entre amostras não extraída e extraída passa a ser maior. Novamente, fica evidente o elevado grau de dispersão dos resultados de ângulo de fase para o ensaio conduzido à tração-compressão. Com as curvas geradas, nota-se um comportamento viscoelástico similar para as frequências intermediárias e mais elevadas. Já, a frequências abaixo de 1Hz, esse comportamento passa a divergir, principalmente quando comparadas as amostras ensaiadas por compressão à amostra submetida à tração-compressão, que apresentou menores valores de δ . Essa característica já havia sido observada para a mistura modificada por borracha. Pode-se ainda ratificar o que Faccin (2018) havia constatado a respeito das misturas com asfalto borracha, as quais apresentam menor módulo dinâmico que a mistura com CAP 50/70 e, conseqüentemente, são menos rígidas nestas condições de temperatura (21°C) e para frequências abaixo de 0,1Hz, indicando pior desempenho frente à deformação permanente, o que não se confirma em campo.

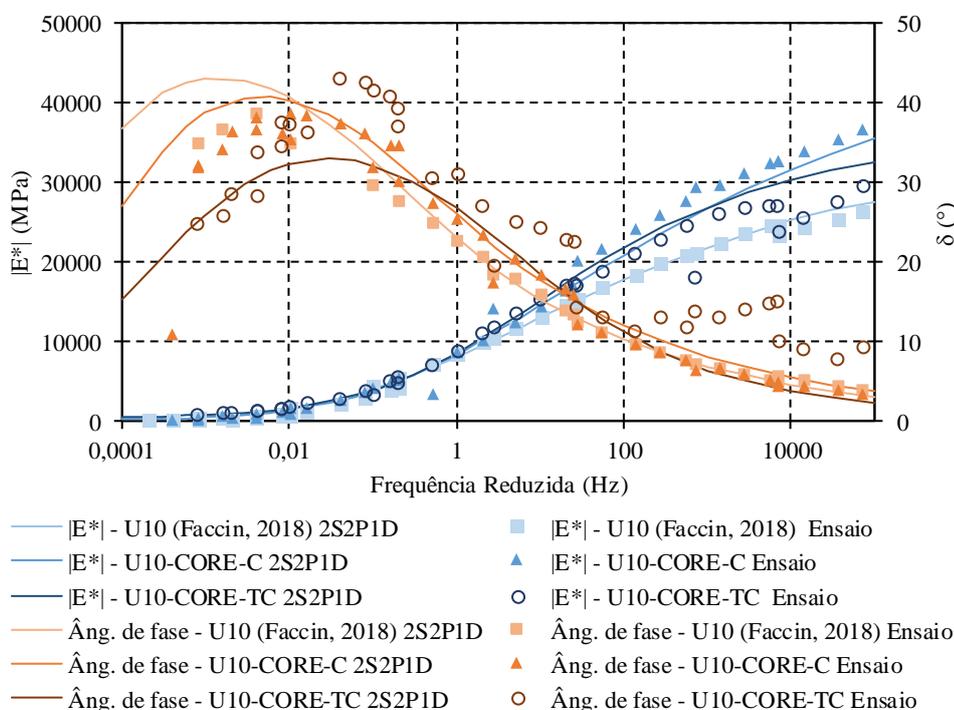


Figura 5: Curvas mestras do módulo dinâmico @ 21°C de U10

Já o concreto asfáltico modificado por polímero, representado na Figura 6, apresentou valores de módulo dinâmico intermediários quando comparados aos das outras duas misturas. Nota-se um padrão de comportamento de aumento da rigidez com o uso de amostras extraídas, mais evidente nas frequências acima de 100Hz. Esse fato pode ser explicado em função da variação entre o Vv das amostras compactadas por Faccin (2018) e das amostras extraídas ser de até 5% menores, aspecto que pode interferir diretamente na rigidez da mistura e consequentemente no seu módulo. Fato que pode ser explicado também pela hipótese de o material ter adquirido maior uniformidade dos vazios de ar da amostra após extração. Acerca do ângulo de fase, independente da mistura, não foram constatadas grandes diferenças no comportamento viscoelástico desses materiais para os ensaios conduzidos à compressão. Entretanto, para os dados do ensaio à tração-compressão, verifica-se mais uma vez expressiva dispersão, aspecto comum a todas as misturas.

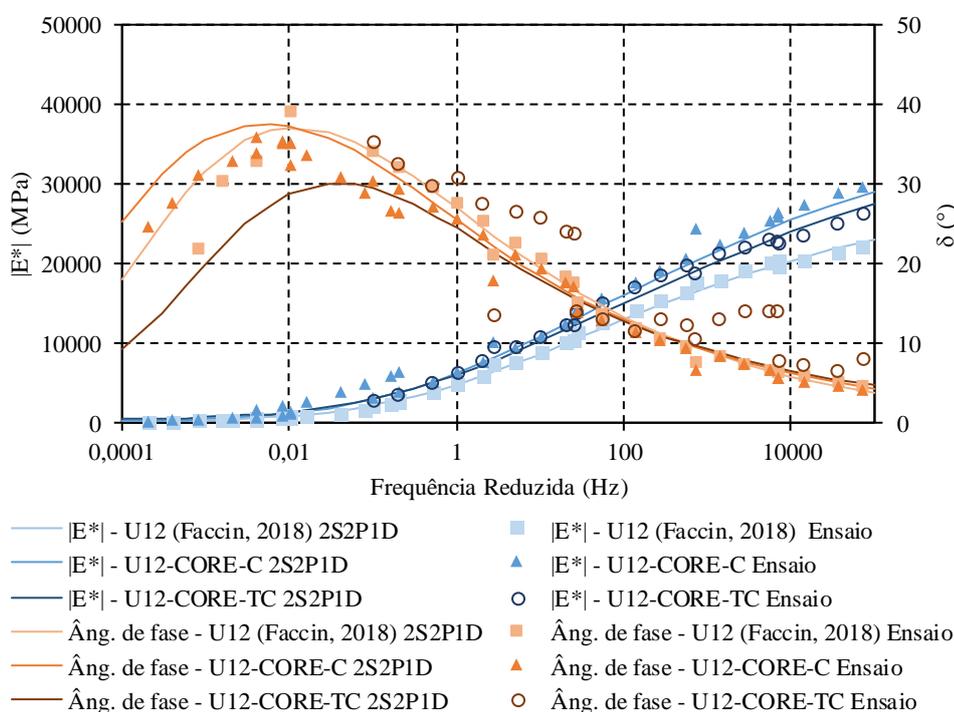


Figura 6: Curvas mestras do módulo dinâmico @ 21°C de U12

Esses resultados indicam que as misturas asfálticas, no geral, exibiram características mais elásticas ao serem submetidas à tração-compressão para temperaturas mais elevadas, ou baixas frequências, quando analisado o ângulo de fase. Entretanto, com o incremento da frequência, os materiais acabam apresentando certa similaridade quanto ao comportamento viscoelástico, tanto em amostras extraídas ou não. A simulação usando o modelo 2S2P1D mostra um bom ajuste para os valores de $|E^*|$ e δ medidos para ensaios de carga por compressão uniaxial.

Entretanto, conforme visto nos gráficos apresentados, percebe-se que os pontos experimentais para os ensaios conduzidos por tração-compressão apresentaram elevada dispersão quanto ao δ . Babadopoulos (2013) afirma que a obtenção experimental do mesmo pode ser bastante complicada, e ressalva a importância de perceber que, enquanto os valores de módulo não são muito afetados pelo tratamento de sinais (pois os picos de tensão e de deformação são pouco

sensíveis à taxa de leitura dos pontos experimentais), o mesmo não é verdadeiro para o ângulo de fase, que precisa ser medido exatamente entre os picos de tensão e de deformação correspondentes. Isso pode explicar por que os ângulos são de difícil aquisição experimental.

Nas Tabelas 2, 3 e 4, demonstram-se as variações dos resultados de $|E^*|$ e δ , respectivamente em porcentagem e em graus, obtidos pelo modelo 2S2P1D das misturas para a seguinte série de frequências reduzidas, $\alpha T.f$, em Hz. Esse comparativo foi analisado respectivamente para ensaios: à compressão de amostras não extraídas e extraídas; à compressão de amostras não extraídas e à tração-compressão de amostras extraídas; e à compressão e à tração-compressão de amostras extraídas. A fim de comparar quanto houve de aumento ou redução nos resultados efetivamente, conforme os diferentes modos de carregamento e condições do corpo de prova.

Para a primeira mistura analisada, Tabela 2, nota-se uma pequena diminuição do módulo, o que caracteriza redução da rigidez do material quando submetido ao processo de extração, para a faixa de frequências consideradas intermediárias. Quanto ao ângulo de fase, observou-se uma diferença pouco expressiva do seu valor com o aumento da frequência, o que representa certa manutenção do seu comportamento viscoelástico. Já, nas demais condições avaliadas, quando comparados os ensaios de compressão aos de tração-compressão, tanto o $|E^*|$ e o δ apresentaram certa variabilidade, à exceção das mais altas frequências, onde essa diferença passa a ser menos expressiva.

Tabela 2: Variações relativas do $|E^*|$ e δ de U3, tomando-se como referência os resultados de amostras não extraídas

$\alpha T.f$ (Hz)	U3 (Faccin, 2018) e U3-CORE-C		U3 (Faccin, 2018) e U3-CORE-TC		U3-CORE-C e U3-CORE-TC	
	$\Delta E^* $	$\Delta\delta$ (°)	$\Delta E^* $	$\Delta\delta$ (°)	$\Delta E^* $	$\Delta\delta$ (°)
0,03	-8%	-1,57	32%	-13,30	43%	-11,73
0,06	-9%	-1,25	21%	-10,47	33%	-9,23
0,1	-10%	-0,92	15%	-8,67	28%	-7,74
0,3	-10%	-0,04	7%	-5,51	19%	-5,47
0,6	-10%	0,57	3%	-3,93	15%	-4,51
1	-10%	1,01	2%	-2,95	12%	-3,96
3	-8%	1,81	0%	-1,27	8%	-3,07
6	-6%	2,14	-1%	-0,50	6%	-2,64
10	-5%	2,29	-1%	-0,08	4%	-2,37
30	-2%	2,34	0%	0,44	2%	-1,90
60	0%	2,23	0%	0,55	1%	-1,69
Média	-7%	0,78	7%	-4,15	16%	-4,94

A mistura com CAP 50/70, representada na Tabela 3, exibe um acréscimo do módulo durante o ensaio à compressão da amostra extraída quando comparada ao corpo de prova que não passou pelo processo de extração, acentuando-se nas maiores frequências analisadas. O mesmo se repete com a segunda análise de variações, entre corpos de prova não extraídos sob compressão e os *cores* submetidos à tração-compressão. Para o comparativo das amostras extraídas submetidas à compressão e à tração-compressão, a variação dos resultados de módulo e ângulo de fase é muito pequena, para a faixa de frequências avaliadas. Além disso, para a maioria dos comparativos, nota-se satisfatória a uniformidade do conjunto de dados.

Tabela 3: Variações relativas do $|E^*|$ e δ de U10, tomando-se como referência os resultados de amostras não extraídas

$\alpha T.f$ (Hz)	U10 (Faccin, 2018) e U10-CORE-C		U10 (Faccin, 2018) e U10-CORE-TC		U10-CORE-C e U10-CORE-TC	
	$\Delta E^* $	$\Delta\delta$ (°)	$\Delta E^* $	$\Delta\delta$ (°)	$\Delta E^* $	$\Delta\delta$ (°)
0,03	-6%	1,05	1%	-4,43	7%	-5,49
0,06	-4%	1,73	-1%	-2,15	3%	-3,88
0,1	-3%	2,14	-2%	-0,64	1%	-2,77
0,3	0%	2,71	0%	1,99	0%	-0,72
0,6	2%	2,86	2%	3,09	0%	0,23
1	4%	2,87	5%	3,60	1%	0,72
3	8%	2,70	11%	3,86	3%	1,16
6	10%	2,51	15%	3,54	4%	1,03
10	12%	2,35	17%	3,15	4%	0,80
30	15%	2,01	21%	2,07	5%	0,07
60	17%	1,81	23%	1,38	5%	-0,44
Média	5%	2,25	8%	1,41	3%	-0,84

Por fim, para a mistura asfáltica modificada por polímero, na Tabela 4, observaram-se as maiores médias de variações, com um acréscimo significativo dos valores de módulo dinâmico para dois dos três comparativos realizados. Para a relação das amostras extraídas sob compressão e tração-compressão, ambas apresentaram rigidezes similares, contando com uma pequena variabilidade e desvio dos resultados. Vale ressaltar que, para todos os casos, a mistura U10 apresentou os menores valores de desvio padrão, de no máximo 9,2%, ressaltando a homogeneidade dos dados avaliados nesse conjunto de frequências.

Tabela 4: Variações relativas do $|E^*|$ e δ de U12, tomando-se como referência os resultados de amostras não extraídas

$\alpha T.f$ (Hz)	U12 (Faccin, 2018) e U12-CORE-C		U12 (Faccin, 2018) e U12-CORE-TC		U12-CORE-C e U12-CORE-TC	
	$\Delta E^* $	$\Delta\delta$ (°)	$\Delta E^* $	$\Delta\delta$ (°)	$\Delta E^* $	$\Delta\delta$ (°)
0,03	39%	-0,74	45%	-6,29	5%	-5,56
0,06	37%	-1,10	39%	-5,25	2%	-4,15
0,1	36%	-1,28	36%	-4,59	0%	-3,31
0,3	34%	-1,47	30%	-3,47	-3%	-2,00
0,6	32%	-1,48	27%	-2,92	-4%	-1,45
1	31%	-1,44	25%	-2,58	-5%	-1,14
3	29%	-1,26	22%	-1,96	-5%	-0,70
6	27%	-1,10	20%	-1,63	-6%	-0,53
10	27%	-0,97	19%	-1,40	-6%	-0,43
30	25%	-0,69	17%	-0,95	-6%	-0,26
60	25%	-0,51	17%	-0,68	-6%	-0,17
Média	31%	-1,09	27%	-2,88	-3%	-1,79

Tendo em mente que o que acontece no pavimento é um fenômeno de tração-compressão, no geral, amostras extraídas e submetidas a carregamentos por compressão e tração-compressão – duas últimas colunas das tabelas, influenciam pouco (principalmente nas frequências médias) na resposta mecânica do material, o que leva a pensar que talvez, para casos práticos

não se justifique toda a complexidade do ensaio conduzido à tração-compressão. Com relação a extração do núcleo das amostras, duas das três misturas testadas, U3 e U10, apresentaram diferenças também pequenas, principalmente nos valores de módulo dinâmico e nas frequências médias, levando a crer que para aplicações práticas seja suficiente a moldagem e ensaio de amostras à compressão.

4. CONCLUSÕES

Destaca-se a influência da extração e retificação dos corpos de prova sobre o V_v das amostras compactadas em laboratório. Observa-se que, para todas as amostras, o V_v variou para menos. Esse fato pode ser explicado pela heterogeneidade de vazios do material quando compactado. Uma vez que o núcleo das amostras compactadas é retirado, seu entorno, que continha a maior parcela de vazios, deixa de fazer parte da estrutura, aspecto que pode também ser observado visualmente e que, para a maioria das amostras ensaiadas, sucedeu-se num aumento da rigidez do material modificado por polímero.

Outro fator analisado da pesquisa foi a influência de se conduzir o ensaio de módulo complexo à compressão com *cores* (amostras extraídas) ou amostras apenas moldadas, em que se constatou uma maior rigidez das misturas asfálticas extraídas. A modelagem 2S2P1D se mostrou adequada na avaliação do comportamento reológico das misturas para os ensaios conduzidos à compressão para as amostras extraídas, ou *cores*. Já, para os dados experimentais obtidos pelo ensaio à tração-compressão, puderam-se notar diferenças do comportamento reológico do material quando ajustados ao modelo, uma vez que os pontos experimentais de ângulo de fase apresentaram muito ruído, dificultando o ajuste do modelo.

Para a faixa média das frequências estudadas, a influência de se extrair o núcleo dos corpos de prova parece ser maior que de realizar ensaios em tração compressão, possivelmente em função da variação de volume de vazios. Por fim, para aplicações práticas, de utilização de valores de módulo dinâmico em projeto, as variações parecem pequenas, levando a crer que não se justificam ensaios de tração-compressão ou mesmo da extração do núcleo das amostras. Cabe, no entanto, ressaltar que tais variações são consideradas válidas para o número de amostras e tipos diferentes de misturas empregadas para esse trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, pelas bolsas de estudo e pesquisa concebidas, e à ANP/Petrobras, pelo auxílio concedido para o desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2011) *AASHTO T 342-11 – Determining dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixtures*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO (2018) *AASHTO TP 107-18 – Determining the damage characteristic curve and failure criterion using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AFNOR (2018) *NF EN 12697-26 Bituminous mixtures - Test methods - Part 26: stiffness - Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour enrobés à chaud - Partie 26: Module de rigidité*. Paris: Association Française de Normalisation.
- Babadopulos, L. (2013) *Avaliação do modelo viscoelástico linear aplicado a misturas asfálticas utilizadas em revestimentos de pavimentos no Brasil*. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ceará, Fortaleza, CE.
- Bernucci, L.; Motta, L. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2010) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. 504 f. 1ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA.
- Di Benedetto, H.; Olard, F.; Sauzéat, C.; Delaporte, B. (2004) *Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous*

- Materials: from binders to mixes. *Road Materials and Pavements Design*, European Asphalt Technology Association, v. 5, p. 163-202.
- Faccin, C. (2018) *Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação*. 220f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Kallas, B. F. (1970) Dynamic modulus of asphalt concrete in tension and tension-compression. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 39, p. 1–23.
- Kim, R. Y. (2009) *Modeling of asphalt concrete*. 1. ed. New York: McGraw-Hill.
- Nascimento, L.; Leite, L.; Campos, E.F.; Marques, G.; Motta, L. (2006) Uso da tomografia computadorizada e de imagens digitais para o estudo de misturas asfálticas. *Anais do Encontro do Asfalto*, 18., Rio de Janeiro/RJ: IBP.
- Olard, F.; Di Benedetto, H. (2003) General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. *Road Materials and Pavement Design*, v. 4, n. 2, p. 185-224.
- Underwood, B. S. (2011) *Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete*. Tese de Doutorado. North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Williams, M. L., Landel, R. F., Ferry, J. D. (1955) The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 77(14), 3701–3707. <https://doi.org/10.1021/ja01619a008>.
- Wu, H.; Huang, B.; Shu, X. (2012) Characterizing viscoelastic properties of asphalt mixtures utilizing loaded wheel tester (LWT). *Road Materials and Pavement Design*, v. 13, n. 1, p. 38-55.

Gustavo dos Santos Pinheiro (gustavopnhr@usp.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo
Av. Prof. Almeida Prado, Travessa do Biênio, 83, Edifício Engenharia Civil – São Paulo, SP, Brasil

Luciano Pivoto Specht

Departamento de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, 1000, Prédio 7 – Santa Maria, RS, Brasil

Cléber Faccin

Centro de Ensino Superior Riograndense

Rodovia Leonel de Moura Brizola (BR-386), km 138 – Sarandi, RS, Brasil

Pablo Menezes Vestena

Departamento de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, 1000, Prédio 7 – Santa Maria, RS, Brasil

Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopolus

Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará
Campus Universitário do Pici, Bloco 710, Parquelândia – Fortaleza, CE, Brasil

Deividi da Silva Pereira

Departamento de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, 1000, Prédio 7 – Santa Maria, RS, Brasil