

# Determinação do módulo dinâmico de misturas asfálticas por meio de testes ultrassônicos

*Determining the dynamic modulus of asphalt mixtures using ultrasonic testing*

Keila Rodrigues Rabelo<sup>1</sup>, Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos<sup>1</sup>,  
Jorge Barbosa Soares<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil

Contato: keila.rrabelo@gmail.com,  (KRR); babadopulos@ufc.br,  (LFALB); jsoares@det.ufc.br,  (JBS)

## Recebido:

26 de julho de 2022

## Aceito para publicação:

31 de agosto de 2023

## Publicado:

20 de dezembro de 2023

## Editor de Área:

Kamilla Vasconcelos,  
Universidade de São Paulo, Brasil

## Palavras-chave:

Teste ultrassônico.  
Propagação onda P.  
Viscoelasticidade.  
Mistura asfáltica.  
Módulo dinâmico.

## Keywords:

Ultrasonic testing.  
P-wave propagation.  
Viscoelasticity.  
Asphalt mixture.  
Dynamic modulus.

DOI: 10.58922/transportes.v31i3.2788



## RESUMO

Testes ultrassônicos têm sido adaptados nas últimas décadas para a determinação do módulo dinâmico em misturas asfálticas. A técnica é promissora, pois o nível de deformações durante o teste permite a caracterização no regime viscoelástico linear, além de serem ensaios rápidos e não destrutivos. Pode haver divergência com os resultados de ensaios clássicos, devido aos tratamentos de dados, provenientes da adaptação de variáveis nas equações de comportamento, bem como da complexidade do material e de como as ondas se propagam por ele. O presente trabalho estuda a influência das variáveis da equação que descreve a relação entre os parâmetros de comportamento (módulo, coeficiente de Poisson e ângulo de fase) e a velocidade do pulso ultrassônico. Os parâmetros materiais são obtidos de forma indireta. Os resultados do teste ultrassônico foram combinados ao modelo reológico 2S2P1D para a obtenção das variáveis buscadas (módulo e coeficiente de Poisson) e comparados aos resultados de ensaios convencionais. Aponta-se que a simplificação em considerar o ângulo de fase nulo e o valor constante de coeficiente de Poisson leva a erros de 8,6% para altas temperaturas e 3,4% para baixas temperaturas. Apesar das limitações, particularmente do acesso apenas a módulos no ramo de altas frequências da curva mestra, a técnica é promissora por permitir uma caracterização adequada, não destrutiva, rápida e de acordo com as características do material.

## ABSTRACT

In the last decades, ultrasonic testing has been adapted to determine the dynamic modulus of asphalt mixtures. This technique is promising because strain levels during the test allow the characterization in the linear viscoelastic regime, in addition of being fast non-destructive tests. There may be differences between its results and those of classical tests, mainly due different data treatment, resulting from the adaptation of variables in behavior equations, as well as the complexity of the material, and of how the waves propagate within it. The present paper studies the influence of variables in the equation that describes the relationship between mechanical behavior parameters (modulus, Poisson's ratio and phase angle) and the ultrasonic pulse velocity. Material parameters are obtained in an indirect manner. The ultrasonic test results were combined with the 2S2P1D rheological model to obtain those variables and were compared to the results from classical tests. Results show that the simplification in considering nil phase angle and a constant value of Poisson's ratio leads to errors of 8.6% for high temperatures and 3.4% for low temperatures. Despite limitations of access to only the high frequency range of master curves, the technique is promising because it allows an adequate, nondestructive and fast characterization in accordance to the characteristics of the material.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de técnicas Não Destrutivas (ND) baseadas na propagação de ondas ultrassônicas está bem consolidada na construção civil. Essas técnicas são comumente aplicadas para determinar parâmetros reológicos no concreto, ocorrência de fissuras e processos corrosivos. Além disso, a formulação teórica para análise desses testes se baseia no domínio da frequência em vez do domínio do tempo, o que reduz o tempo necessário para realização dos testes, com resultados praticamente imediatos. Nas últimas décadas, as técnicas ND em misturas asfálticas têm sido adaptadas para a determinação do parâmetro de rigidez conhecido como módulo dinâmico, o qual descreve o comportamento viscoelástico de misturas asfálticas juntamente com o ângulo de fase. No entanto, na adaptação desses métodos, pode haver divergência com os resultados de ensaios clássicos, devido aos tratamentos de dados, provenientes da adaptação de variáveis nas equações de comportamento que relacionam os parâmetros do comportamento reológico com a velocidade da propagação de ondas, bem como da complexidade do material e de como as ondas se propagam por ele.

Jiang et al. (2011) relatam que as altas frequências utilizadas em testes ultrassônicos (geralmente da ordem de mais de 50 kHz) podem dificultar o cálculo de um módulo dinâmico próximo de valores geralmente encontrados, dado que a caracterização convencional trabalha numa faixa de frequências de 0,1 a 25 Hz (AASHTO, 2011; DNIT, 2019). Contudo, há duas informações a considerar: i) natureza termo-viscoelástica do material, em que aumentos de frequência produzem o mesmo efeito na rigidez que diminuições de temperatura e ii) o emprego do ensaio ultrassônico se justifica por atuar no domínio de pequenas deformações que permitem a caracterização viscoelástica linear (VEL) de misturas asfálticas. O comportamento VEL de misturas asfálticas se manifesta diante de deformações da ordem de  $10^{-5}$  m/m ou menos (Mangiafico et al., 2018), ao passo que as ondas ultrassônicas provocam deformações abaixo de  $10^{-6}$  m/m (Mounier, Di Benedetto e Sauzéat, 2012).

Com a evolução dos métodos de dimensionamento de pavimentos no Brasil, considerando-se o uso de parâmetros de rigidez para o dimensionamento, será necessária a determinação desta rigidez tanto em laboratório, de modo a servir como *input* de métodos mecânico empíricos, como também a adoção de algum tipo de controle tecnológico em campo. Enquanto em laboratório se adotam ensaios clássicos, porém demorados (Módulo Complexo), os ensaios ultrassônicos se apresentam como alternativa para determinação rápida de módulo de misturas asfálticas, e ainda com potencial uso em controle tecnológico, dadas sua rapidez e simplicidade. Diante do exposto, este trabalho visa determinar o parâmetro reológico conhecido como Módulo Dinâmico ( $|E^*|$ ) de uma mistura asfáltica por meio de testes ultrassônicos, além de verificar a influência da variação do coeficiente de Poisson ( $\nu^*$ ) e do ângulo de fase ( $\phi$ ) nos resultados de  $|E^*|$  obtido por um processo de retroanálise.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os parâmetros reológicos que governam o comportamento viscoelástico linear nas misturas asfálticas são o Módulo complexo ( $E^*$ ) e o coeficiente de Poisson complexo ( $\nu^*$ ). O  $E^*$  relaciona as amplitudes e o atraso (medido pelo ângulo de fase -  $\phi$ ) dos sinais de

tensão e de deformação em estado estacionário para uma carga harmônica (Papazian, 1962). O módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) é o nome dado ao valor absoluto do módulo complexo e corresponde à constante de proporcionalidade entre as amplitudes de tensão e de deformação. O coeficiente de Poisson, por simplicidade, costuma ser considerado constante, notado  $\nu$ . No Brasil, a determinação experimental do coeficiente de Poisson de misturas asfálticas ainda não é uma realidade nem nos centros de pesquisa acadêmicos e costuma-se adotar um valor de 0,3, independentemente da temperatura e da frequência, para análises elásticas (Bernucci et al., 2010; Theisen, 2011; Babadopulos et al., 2014).

A obtenção experimental convencional de  $E^*$  ocorre por meio de testes cíclicos axiais, comumente de compressão, por simplicidade de execução (AASHTO, 2011; DNIT, 2019). O referido ensaio é realizado em diferentes temperaturas e frequências de carregamento. A curva mestra tem sido uma ferramenta importante para a representação gráfica do comportamento VEL de misturas asfálticas, por permitir a avaliação dos efeitos das variações climáticas e da velocidade do tráfego. A construção desse gráfico é possível devido à aplicação do Princípio da Superposição Tempo Temperatura (PSTT), o qual permite obter uma frequência equivalente de carregamento na temperatura de referência adotada em que as propriedades VEL obtidas na frequência e na temperatura testada ocorrem. Os dados de módulo em função da frequência de carregamento (isotermas) para diferentes temperaturas são transladados horizontalmente com a utilização de um fator de ajuste para cada temperatura, conhecido como *Shift factor* (Williams, Landel e Ferry, 1955).

### 2.1. Propagação de ondas em sólidos

As ondas mecânicas são pequenas perturbações causadas devido à rápida aplicação de uma tensão em torno de seu estado de equilíbrio e propagadas por efeitos de inércia (dinâmicos). Isso induz um campo não homogêneo de pequenas deformações no material (Carret, 2019). Em geral, há dois tipos de ondas: de corpo e de superfície. Em sólidos, as ondas de corpo se propagam radialmente para fora da fonte e os modos de oscilação podem ser a compressão (Ondas P, primárias, estudadas neste trabalho) e o cisalhamento (Ondas S, secundárias, pois costumam se propagar mais lentamente). As ondas P provêm de movimentos compressivos, dilatadores e longitudinais, viajando com movimentos de partículas paralelos à direção de propagação. Durante a propagação, existem forças resistentes que impedem que as partículas sejam comprimidas e dilatadas, sendo essas forças entre dois pontos atribuídas às propriedades elásticas do meio (Cheeke, 2002). Nos ensaios clássicos de módulo complexo, o carregamento é quasi-estático, ou seja, com variação de carga suficientemente lenta para que os efeitos dinâmicos (de inércia) possam ser desprezados. O termo “módulo dinâmico” usado na área de materiais betuminosos não tem, portanto, nenhuma relação com efeitos de inércia, sendo apenas o valor absoluto do módulo complexo. Em outras áreas, restringe-se o uso do termo módulo dinâmico aquele obtido a partir de propagação de onda (ASTM, 2016; Cheeke, 2002).

### 2.2. Módulo dinâmico de misturas asfálticas por meio de ensaios ultrassônicos

Na aplicação de testes ultrassônicos em misturas asfálticas, a velocidade de propagação das ondas de compressão está diretamente relacionada ao módulo dinâmico ( $|E^*|$ ), bem como às propriedades de massa específica ( $\rho$ ), de ângulo de fase ( $\phi$ ) e de coeficiente de

Poisson ( $\nu$ ) (Di Benedetto, Sauzéat e Sohm, 2009; Norambuena-Contreras et al., 2010; Mounier, Di Benedetto e Sauzéat, 2012; Larcher et al., 2015). A Equação 1 (Mandel, 1966) expressa a relação das variáveis supracitadas, em que  $C_P$  é a velocidade de propagação do pulso de ondas P, de compressão.

$$C_P = \frac{1}{\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)} \sqrt{\frac{(1-\nu)|E^*|}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (1)$$

O método de obtenção dos valores de  $\nu$  e  $\phi$  diverge entre autores. Di Benedetto, Sauzéat e Sohm (2009) obtiveram  $\nu$  de forma experimental, por meio de testes cíclicos, baseados em Di Benedetto, Delaporte e Sauzéat (2007), medindo o deslocamento radial nos ensaios de tração-compressão. Os autores ainda apontam que o erro produzido pela estimativa de  $\nu$  é mais relevante para altas temperaturas (em torno de 42°C), atingindo valores em torno de 10%. Norambuena-Contreras et al. (2010) e Larcher et al. (2015) consideraram  $\nu$  como uma constante e os  $\phi$  resultantes do ensaio clássico. Por fim, Mounier, Di Benedetto e Sauzéat (2012) ajustaram os resultados experimentais de  $|E^*|$  com o modelo reológico 2S2P1D, e, assim, obtiveram  $\nu$  e  $\phi$ . A Tabela 1 apresenta as faixas de valores considerados pelos autores supracitados.

**Tabela 1:** Coeficiente de Poisson em testes ultrassônicos

Autores	Coeficiente de Poisson	Temperaturas
Di Benedetto, Sauzéat e Sohm (2009)	0,15 a 0,35	-19°C; 26°C; 40°C
Norambuena-Contreras et al. (2010)	0,36	22°C
Mounier, Di Benedetto e Sauzéat (2012)	0,15 a 0,35	-19°C a 40°C
Larcher et al. (2015)	0,36	-20°C a 40°C

Observa-se nos trabalhos supracitados que os testes ultrassônicos tendem a superestimar os resultados dos  $|E^*|$  em relação aos módulos obtidos pelo ensaio clássico. Tal superestimação ocorre em Norambuena-Contreras et al. (2010), Mounier, Di Benedetto e Sauzéat (2012) e Larcher et al. (2015) e pode ser vista claramente nas suas respectivas curvas mestras. Entre os diversos motivos que a justificam deve haver efeito de não linearidade física reversível (Mangiafico et al., 2018; Nguyen et al., 2015; Babadopulos et al., 2019), que em misturas asfálticas pode ocorrer mesmo em amplitudes pequenas, normalmente consideradas como parte da zona de comportamento “linear” (deformações de até cerca de 100  $\mu\text{m}/\text{m}$ ). As ordens de grandeza dos efeitos de não linearidade sobre o valor inicial de módulo, conforme os trabalhos citados são da ordem de 0,1%/ $\mu\text{m}/\text{m}$  (a cerca de 10°C e 1 Hz), com maiores temperaturas e menores frequências induzindo maior efeito de não linearidade. Em outras palavras, uma diferença de nível de amplitude de deformação da ordem de 1  $\mu\text{m}/\text{m}$  para 100  $\mu\text{m}/\text{m}$  pode causar uma diminuição da ordem de 10% no módulo, o que deve ser esperado ao se comparar resultados de módulo com aplicações de pulsos ultrassônicos (que possuem pequeníssimas deformações) com resultados de ensaios quase-estáticos. Outros motivos para superestimações envolvem hipóteses equivocadas sobre o valor do coeficiente de Poisson, conforme discutido neste artigo.

Nota-se também que os erros nos resultados de  $|E^*|$  aumentam para temperaturas elevadas. Para a temperatura de 40°C, Mounier, Di Benedetto e Sauzéat (2012) obtiveram erros de 32% e para as demais temperaturas os erros estiveram em torno de 20%. Para ensaios a 42°C, Di Benedetto, Sauzéat e Sohm (2009) calcularam erros de 18,3%, e, menos de 10% para temperaturas mais baixas, comparando-se com resultados de  $|E^*|$  do modelo 2S2P1D.

Por fim, na construção da curva mestra, o método foi validado com o princípio de superposição tempo-temperatura para frequências altas, em torno de 10 kHz (Di Benedetto, Sauzéat e Sohm, 2009). Essa limitação se deve ao resultado de  $|E^*|$  ser fornecido em uma única frequência (frequência do transdutor) e para cada temperatura de teste. A plotagem da curva mestra é realizada com o auxílio dos fatores de translação conhecidos da mistura pelo ajuste de modelos reológicos anteriormente ajustados a resultados de ensaios clássicos (Di Benedetto, Sauzéat e Sohm, 2009; Mounier, Di Benedetto e Sauzéat, 2012; Larcher et al., 2015). Para uma caracterização mais ampla do espectro de frequências, são necessárias técnicas mais avançadas, que não serão abordadas aqui (Gudmarsson et al., 2015; Carret, Di Benedetto e Sauzeat, 2020).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Características das amostras

A Tabela 2 apresenta as características físicas das amostras investigadas. A dosagem foi realizada de acordo com o método Superpave (AASHTO, 2017), visando à obtenção de uma mistura asfáltica com Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 12,5 mm e com 4% de vazios. Ademais, todas as amostras possuem ligante modificado por polímero (AMP 60/85) e a mesma granulometria em sua composição.

**Tabela 2:** Características das amostras

Amostra	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de ligante (%)	Volume de vazios (%)
1	100	163	2,256	5,9	3,7
2	100	164	2,253	5,9	3,8
3	100	162	2,257	5,9	3,6

As normas AASHTO (2017) e AASHTO (2011) foram seguidas, com exceção do tamanho de corpo de prova visado de 147,5 mm a 152,5 mm. Os corpos de prova foram moldados nas dimensões desejadas, pois de acordo com Silva, Bastos e Soares (2022), não houve diferença significativa nos testes de módulo dinâmico com corpos de prova extraídos ou moldados, apesar de a literatura apontar a existência de um gradiente de volume de vazios. Nessa pesquisa, a prioridade foi manter um valor próximo de volume de vazios entres as amostras testadas, pois é uma propriedade que tem grande influência na rigidez de misturas asfálticas. Portanto, as propriedades representam valores de certa forma médios para o volume completo do corpo de prova.

#### 3.2. Ensaio quasi-estático cíclico de compressão axial

O ensaio quasi-estático cíclico realizado nas amostras de concreto asfáltico consiste no ensaio convencional de Módulo Complexo na prensa hidráulica UTM 25. O ensaio segue as

recomendações da AASHTO (2011) e DNIT (2019) com frequências de carregamento: 0,1 Hz; 0,5 Hz; 1 Hz; 5 Hz; 10 Hz; 25 Hz, e, temperaturas de teste: -10°C; 4,4°C; 21,1°C; 37,8°C; 54°C. Ressalta-se que as temperaturas estabelecidas em DNIT (2019) divergem em até 2,2°C (-10°C; 4°C; 20°C; 40°C; 54°C), porém o procedimento de ensaio é semelhante e, consequentemente as curvas mestras resultantes são equivalentes.

### **3.3. Ensaio de propagação de pulso ultrassônico**

O equipamento Pundit Lab, comumente utilizado em concreto de cimento *Portland*, foi utilizado para induzir o pulso ultrassônico em uma superfície das amostras cilíndricas de misturas asfálticas e medir a chegada da onda na outra. Dispõe de transdutores de superfície plana de 50 mm de diâmetro, que trabalham a uma frequência nominal de 54 kHz. A medição é caracterizada como direta, pois a disposição dos transdutores no ato da medição assegura a transmissão máxima do sinal. Os resultados fornecidos pelo equipamento são as medidas de perturbação, em Volts (V) ou em % da amplitude enviada, obtida a cada 0,5  $\mu$ s.

#### **3.3.1. Calibração do sistema e análise de atraso do sinal**

A calibração do dispositivo foi realizada de acordo com o manual do fabricante. Além disso, o atraso foi verificado posicionando os transdutores em contato direto, de maneira a se obter tempo de voo do pulso de 0,00  $\mu$ s, ou seja, sem qualquer atraso na emissão do sinal do equipamento.

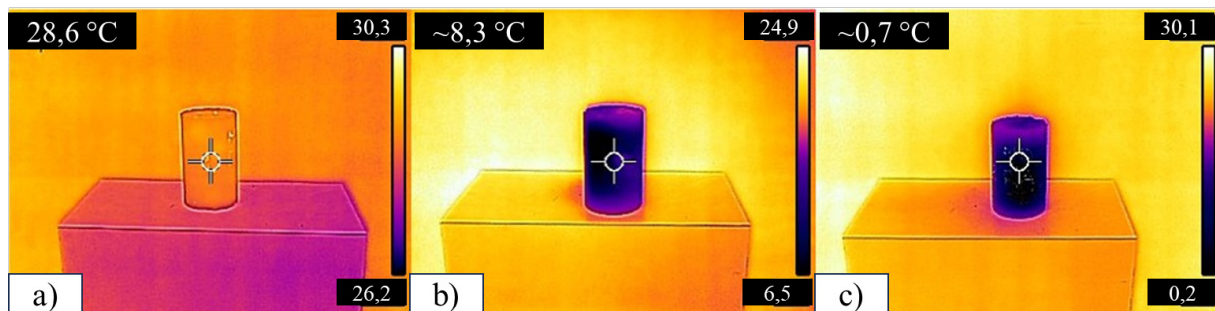
#### **3.3.2. Controle da temperatura da amostra**

Para verificar a temperatura das amostras antes do teste ultrassônico (permitindo-se adequada avaliação do fator de translação de acordo com o PSTT) foi utilizada uma câmera termográfica. O referido equipamento capta apenas as temperaturas de superfície do corpo de prova (CP), conforme apresentado na Figura 1. A existência de um gradiente térmico desconhecido no interior da amostra, devido ao intervalo de tempo entre a retirada do CP da geladeira e a medição, pode provocar diferenças indesejadas entre a real temperatura do CP e a temperatura medida na superfície. No entanto, durante o procedimento, garantiu-se que esse intervalo entre a retirada e a medição fosse o menor possível, entre 2 e 4 minutos, para não afetar os resultados consideravelmente. Para isso, recomenda-se que uma câmara térmica seja dedicada a esse controle de temperatura nos CP para testes ultrassônicos.

Com o objetivo de reduzir o tempo de ensaio (todos os testes ultrassônicos na mesma tarde) e evitar grandes gradientes de temperatura, utilizou-se um CP para os ensaios a cada temperatura. A Figura 1 apresenta as temperaturas nas quais os testes ultrassônicos foram realizados. O período de condicionamento de temperatura prosseguiu da seguinte forma:

- 1º CP foi mantido a temperatura ambiente, a qual se aferiu como 28,6°C;
- 2º CP permaneceu por 5 h em câmara térmica para atingir a temperatura superficial de 8,3°C;

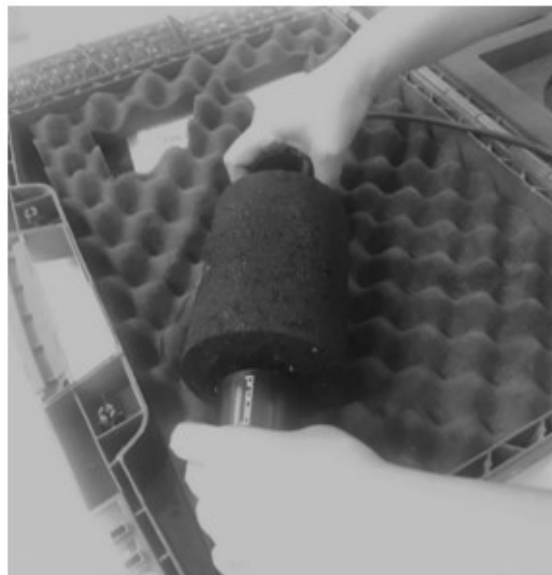
- 3º CP foi mantido em câmara térmica por um período de 10 h para atingir a temperatura aferida de 0,7°C.



**Figura 1.** Temperaturas aferidas nos CPs com câmera termográfica antes dos pulsos. 1º CP com temperatura de 28,6°C (a), 2º CP com temperatura de 8,3°C (b) e 3º CP com temperatura de 0,7°C (c).

### 3.3.3. Configuração do teste ultrassônico

Nesse método, a medição é realizada posicionando-se e fixando-se 2 sensores, um em cada extremidade da amostra cilíndrica. Uma onda de compressão (onda “P”) é gerada pelo 1º transdutor (emissor) e é recebida pelo 2º transdutor (receptor), mostrados na Figura 2. A amostra cilíndrica foi posicionada em uma base de espuma de poliestireno para evitar o efeito da propagação de ondas na base de suporte. Os sinais gravados pelos dois sensores são monitorados para determinar o tempo de voo da onda ( $T_p$ ) necessário para que a onda percorra a distância  $L$  dentro da amostra.



**Figura 2.** Execução do teste ultrassônico.

### 3.3.4. Determinação da velocidade de propagação da onda de compressão

Foram aplicados cinco pulsos para aferição do tempo de voo. Calculou-se o valor médio do tempo de voo para cada temperatura, calculando-se em seguida a velocidade da onda de compressão a partir do tempo de voo médio (Equação 2). Posteriormente, os valores da velocidade de onda são utilizados para calcular o  $|E^*|$  da mistura asfáltica, a partir da

Equação 3 (obtida a partir da Equação 1). Para utilizá-la, deve-se assumir por hipótese os valores de  $\phi$  e  $\nu$ , sendo essa escolha discutida na seção 4.2.

$$C_p = L/T_p \quad (2)$$

$$|E^*| = C_p^2 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \rho \frac{(2\nu-1)(\nu+1)}{(\nu-1)} \quad (3)$$

### 3.3.5. Análise espectral – estudo no domínio da frequência

Devido ao fato de o teste ultrassônico envolver a emissão de um sinal que percorre a amostra, se torna necessário converter os resultados que são fornecidos no domínio do tempo (amplitudes vs. tempo) para o domínio da frequência (amplitudes vs. frequência). Para isso, é utilizado um algoritmo numérico de análise discreta de dados conhecido como Transformada Rápida de Fourier – TRF, que detecta as frequências de sinal emitidas pela fonte, associando-as às suas respectivas intensidades (amplitudes).

### 3.3.6. Definição da frequência reduzida

A frequência reduzida ( $fr$ ) pode ser obtida por meio da Equação 4 (aplicação do PSTT), na qual  $f$  é a frequência de teste, nesse caso, a frequência obtida a partir da análise dos resultados da TRF. O fator de deslocamento  $a_T$  é dependente da temperatura, ou seja,  $T$  é a temperatura de teste e  $T_{ref}$  é a temperatura de referência para obtenção da curva (Equação 5).

$$fr = f * a_T \quad (4)$$

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T-T_{ref})}{C_2+T-T_{ref}} \quad (5)$$

A metodologia utilizada para determinação dos fatores de ajuste ( $a_T$ ) das amostras se baseou na equação (Equação 5) de Williams, Landel e Ferry (Williams, Landel e Ferry, 1955). As constantes utilizadas foram provenientes da análise dos resultados do ensaio clássico de Módulo complexo ( $C_1 = 18,636$ ,  $C_2 = 143,709^\circ\text{C}$  e  $T_{ref} = 21,1^\circ\text{C}$  para todos os CPs desta pesquisa).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Medição direta do tempo de voo e velocidade da onda de compressão

A Tabela 3 apresenta os resultados das leituras com seus respectivos tempos de voo e velocidades de onda calculados. No cálculo da velocidade, considerou-se o valor médio das cinco leituras. Os valores de tempo de voo indicam que o teste mostrou boa repetibilidade.

### 4.2. Definição das variáveis da Equação 1

Em resumo, as variáveis da Equação 1 foram obtidas da seguinte forma:

- Massa específica das amostras ( $\rho$ ) indicadas na Tabela 2;
- Velocidade da onda de compressão ( $C_p$ ) obtida pela medição do tempo de voo médio apresentado na Tabela 3 com aplicação da Equação 2;



- Ângulo de fase ( $\phi$ ) obtido por meio do modelo reológico 2S2P1D ajustado aos resultados do ensaio clássico de módulo complexo, tendo também como *input* a frequência oriunda da TRF do sinal ultrassônico;
- Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), obtido pela Equação 3, a qual utilizou como variáveis de entrada, os resultados de ângulos de fase e os módulos dinâmicos do 2S2P1D calibrados a partir do ensaio clássico de Módulo complexo, porém referentes à frequência da TRF do sinal ultrassônico. A rigor, o valor do  $\nu$  precisaria ser adotado por hipótese, e o valor obtido nessa etapa corresponde àquele que melhor ajusta a Equação 3 com o valor de  $|E^*|$  proveniente dos ensaios clássicos. Isso foi feito para evitar o efeito do valor de  $\nu$  adotado no erro medido, algo estudado em mais detalhes através de um estudo paramétrico;
- Por fim, após as definições das variáveis anteriores, é possível calcular  $|E^*|$  por meio da Equação 3.

Tabela 3: Resultados das medições

Amostra	1		2		3	
	28,6		8,3		0,7	
Temperatura (°C)						
Leitura	Tempo de voo ( $\mu$ s)	$C_p$ (m/s)	Tempo de voo ( $\mu$ s)	$C_p$ (m/s)	Tempo de voo ( $\mu$ s)	$C_p$ (m/s)
1	43,7	3730	39,4	4162	38,3	4230
2	43,7	3730	39,7	4131	38,5	4208
3	43,2	3773	38,0	4316	39,2	4133
4	43,2	3773	38,7	4238	38,6	4197
5	43,2	3773	40,0	4100	38,1	4252
Média	43,4	3756	39,2	4188	38,5	4203
Desvio Padrão	0,2	20,7	0,6	69,9	0,3	31,2
CV (%)	0,6	0,6	1,7	1,7	0,7	0,7

Os resultados da Tabela 3 mostram uma boa repetibilidade nas cinco leituras realizadas, que apresentaram baixos valores de desvio padrão e coeficiente de variação (CV). O valor máximo de CV observado foi de 1,7% na temperatura de 8,3°C, ou seja, menor do que 2%. Para as outras duas temperaturas, o CV foi menor do que 1%. Quando comparado com os resultados encontrados em Di Benedetto, Sauzéat e Sohm (2009), para a velocidade de onda P ( $C_p$ ), os desvios padrões e coeficientes de variação estão abaixo dos valores máximos encontrados pelos referidos autores. Já quando comparado com os resultados de Norambuena-Contreras et al. (2010), que realizaram testes a 22°C, os valores de CV para o tempo de voo e  $C_p$  são próximos e menores do que 1%, assim como encontrado na presente pesquisa.

#### 4.2.1. Análise no domínio da frequência

Foi realizada a análise de Fourier dos sinais gravados do receptor, considerando a disposição do equipamento como na Figura 2, para todas as leituras. Como discorrido anteriormente, a TRF fornece uma média do conteúdo de frequência durante toda a emissão do sinal. A Figura 3a ilustra a curva do sinal no domínio do tempo, enquanto a Figura 3b apresenta a amplitude máxima do sinal correspondente a cada valor de frequência característica.

Observa-se na Figura 3b que existem dois picos de amplitude máxima, em frequências distintas. A frequência do transdutor é de 54 kHz, e, esse pico de frequência de 12,5 kHz

apresenta-se incompatível com o sinal que foi emitido, o que indica a excitação de outro tipo de vibração diferente da onda P enviada. Sendo assim, optou-se por utilizar a frequência do segundo pico de 53,125 kHz, correspondente ao valor aproximado da frequência emitida. Essa frequência será utilizada no cálculo da frequência reduzida e na montagem da curva mestra a partir dos resultados de ensaios ultrassônicos.

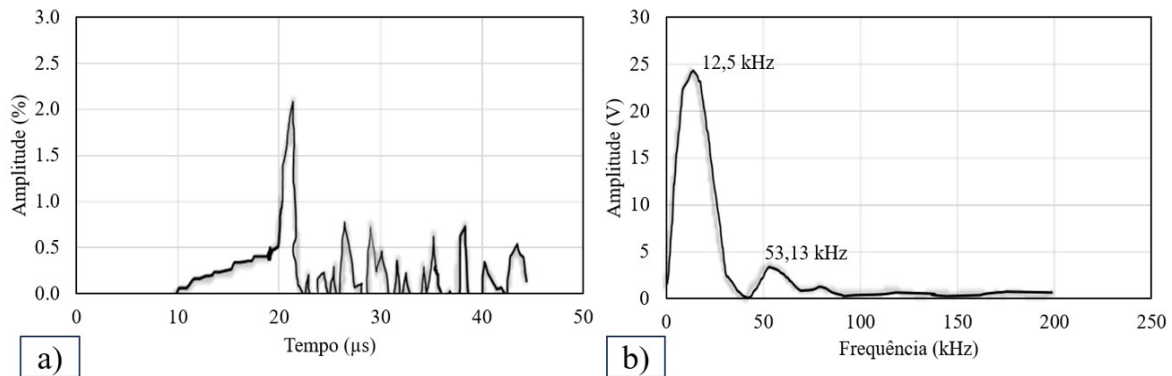


Figura 3. Análise no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b).

#### 4.2.2. Frequência reduzida

A partir dos parâmetros da Equação WLF apresentados e das temperaturas de ensaio de 28,6°C, 8,3°C e 0,7°C, é possível calcular o fator de deslocamento  $a_T$  (Equação 5). Posteriormente, calcula-se a frequência reduzida ( $f_r$ ) a partir da frequência resultante da TRF (Equação 4), que é de 53,125 kHz. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Fatores de deslocamento e frequências reduzidas

Temperatura (°C)	28,6	8,3	0,7
$\log(a_T)$	-0,924	1,822	3,083
Fatores de ajuste ( $a_T$ )	0,119	66,405	1210,956
Frequência original (kHz)	53,125	53,125	53,125
Frequência reduzida (kHz)	6.323	3.527.784	64.332.044

#### 4.2.3. Ângulo de fase e coeficiente de Poisson

Os ângulos de fase ( $\phi$ ) e os módulos dinâmicos  $|E^*|$  da Tabela 5 foram determinados a partir das frequências reduzidas da Tabela 4, no modelo reológico 2S2P1D calibrado com os resultados experimentais do ensaio clássico de módulo complexo. Posteriormente, esses resultados de  $\phi$  e  $|E^*|$ , foram empregados na Equação 3, em conjunto com a velocidade ( $C_p$ ) e a massa específica ( $\rho$ ), para a obtenção do valor de  $v$  que corresponde àquele que melhor ajusta a Equação 3 com o valor de  $|E^*|$  proveniente dos ensaios clássicos. Para cada temperatura de teste, os resultados estão indicados na Tabela 5. Observa-se ainda que os valores de  $v$  variam pouco entre si utilizando-se esse método de ensaio (altas frequências) e cálculo. Isso é compatível com o comportamento VEL esperado próximo à assíntota de altas frequências e baixas temperaturas (proximidade do regime elástico). Ainda assim, foi realizada uma análise de sensibilidade para investigar a influência da consideração de outros valores de  $v$  no valor calculado de módulo, dado que esse parâmetro raramente é disponível e deverá ser adotado por hipótese no uso da Equação 3 que fornece o  $|E^*|$  a partir dos ensaios ultrassônicos.

**Tabela 5:** Parâmetros reológicos

Temperatura (°C)	28,6	8,3	0,7
Ângulo de fase - 2S2P1D	7,596	2,039	1,031
Módulo dinâmico $ E^* $ - 2S2P1D (MPa)	18.340	24.668	25.823
Coef. de Poisson $\nu$ (Equação 3)	0,366	0,349	0,341

### 4.3. Análises de sensibilidade dos parâmetros reológicos

Nesta seção é realizada a análise de influência dos valores de  $\phi$  e de  $\nu$  nos valores calculados de  $|E^*|$  da mistura asfáltica. Essa análise foi realizada por meio do isolamento das referidas variáveis da Equação 3.

#### 4.3.1. Influência da variação do coeficiente de Poisson nos valores de $|E^*|$

Essa análise partiu dos valores de  $\nu$  definidos na Tabela 5 e esses resultados são normalmente dependentes das frequências reduzidas, mas foram adotados nas diversas temperaturas como se fossem valores fixos, como é prática comum. Além desses, foram adotados valores compatíveis com a literatura (Tabela 1): de 0,25 a 0,40 e o valor de 0,3, usual para misturas brasileiras. Dessa forma, foram encontrados quatro valores de  $|E^*|$ , considerando quatro valores distintos de  $\nu$ . A Tabela 6 expõe os erros nos valores de  $|E^*|$  calculados devido à variação de  $\nu$ . O erro foi calculado considerando o valor de  $|E^*|$  encontrado na Tabela 5 para cada temperatura.

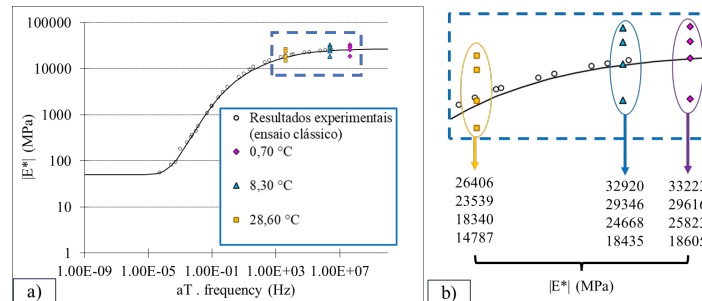
**Tabela 6:** Influência da variação do coeficiente de Poisson no  $|E^*|$  em testes ultrassônicos

	Coef. de Poisson	0,250	0,300	0,366	0,400
	$ E^* $	26406	23539	18340	14787
Temperatura 28,6°C	Erro (%)	-43,98%	-28,35%	0,00%	19,37%
	Coef. de Poisson	0,250	0,300	0,349	0,400
	$ E^* $	32920	29346	24668	18435
Temperatura 8,3°C	Erro (%)	-33,45%	-18,96%	0,00%	25,27%
	Coef. de Poisson	0,250	0,300	0,341	0,400
	$ E^* $	33223	29616	25823	18605
Temperatura 0,7°C	Erro (%)	-28,65%	-14,68%	0,00%	27,95%

Observa-se que os valores de  $|E^*|$  em temperaturas mais altas são mais sensíveis, com maiores erros em função de uma estimativa incorreta do valor de  $\nu$ . Ressalta-se também, a partir da Tabela 6, que a consideração de  $\nu$  no valor usual para misturas brasileiras de 0,3 resulta em erros da ordem de -14,68% para baixas temperaturas e -28,35% para altas temperaturas. Esses erros não são pequenos, embora aceitáveis para uma primeira aproximação. Caso mantido o valor fixo para uma determinada mistura, os resultados podem ser úteis no controle tecnológico a partir da aferição de uma estimativa de módulo a altas frequências. A Figura 4 exibe a curva mestra com os valores de  $|E^*|$  com os diferentes valores de  $\nu$  da Tabela 6.

A próxima análise consiste em adotar o valor intermediário do parâmetro  $\nu$  de 0,349 com base na Tabela 5, e, verificar os resultados de  $|E^*|$  (Tabela 7). Esse valor corresponde àquele que gera 0% de erro em relação ao módulo obtido experimentalmente a 8,3°C. A Tabela 7 indica que a variação de  $\nu$  intermediário resulta em erros menores que 8% em relação aos

valores de  $\phi$  considerados reais, disponibilizados na Tabela 5. Ainda na Tabela 7, as duas linhas finais apresentam os resultados (erros menores que 9%) referentes à análise de sensibilidade do ângulo de fase, abordada a seguir.



**Figura 4.** Curva mestra de módulo dinâmico com resultados do ensaio clássico e ultrassônico (a) e os valores de  $|E^*|$  determinados por ensaio ultrassônico variando coeficiente de Poisson (b).

**4.3.2. Influência da variação do ângulo de fase nos valores de  $|E^*|$**

Di Benedetto, Sauzéat e Sohm (2009) relatam que o erro produzido pelo ângulo de fase é irrelevante, da ordem de 1,5%, independentemente da temperatura do ensaio ultrassônico. Isto posto, a análise de sensibilidade desse parâmetro consiste em adotá-lo como nulo, com o objetivo de reduzir as variáveis da Equação 3. Nessa análise também foi adotado  $\nu = 0,349$ . As duas linhas finais da Tabela 7 apontam os resultados dessa simplificação e sua influência nos resultados de  $|E^*|$ . Observa-se que essa situação é a mais próxima de um cenário real de determinação de módulo a partir de testes ultrassônicos (em que o coeficiente de Poisson e o ângulo de fase serão admitidos por hipótese).

Os ângulos de fase para a gama de frequências da curva mestra obtida são da ordem de 7,6°, 2,0° e 1,0° para as temperaturas de 28,6°C, 8,3°C e 0,7°C, respectivamente, em misturas asfálticas como as que foram testadas. Portanto, o erro cometido é pequeno na equação das velocidades de pulsos ultrassônicos (ver Tabela 7), onde foram obtidos os valores de módulo dinâmico que constam na Tabela 7, quando considerado o ângulo de fase igual a 0°. Isso sugere que a aproximação é razoável para a aplicação buscada de determinar os módulos dinâmicos.

**Tabela 7:** Módulo dinâmico com  $\nu = 0,349$  – teste ultrassônico

Temperaturas (°C)	28,6	8,3	0,7
$ E^* $ experimental (MPa)	18.340	24.668	25.823
$ E^* $ (MPa), $\nu / \nu = 0,349$ ; $\phi =$ Tabela 5	19.787	24.668	24.895
Erro (%)	-7,89	0,00	3,60
$ E^* $ (MPa) $\nu / \nu = 0,349$ ; $\phi = 0$	19.917	24.729	24.951
Erro (%)	-8,60	-0,25	3,38

A Figura 5 exibe a curva mestra com os valores de módulo dinâmico referentes à Tabela 7.

Nota-se que, ao assumir os valores de ângulo de fase e coeficiente de Poisson constantes, e, seus reflexos nos valores de  $|E^*|$  plotados na curva mestra (Figura 5), que os erros da Tabela 7 podem ser considerados desprezíveis dependendo da aplicação, por exemplo para controle tecnológico em campo, conforme discutido nas Seções 1 e 4.3. Para controle tecnológico do  $|E^*|$  em campo, por exemplo, os erros são aceitáveis.

Isso implica numa caracterização adequada de acordo com as características do material viscoelástico, além de ser uma solução rápida e eficiente de controle.

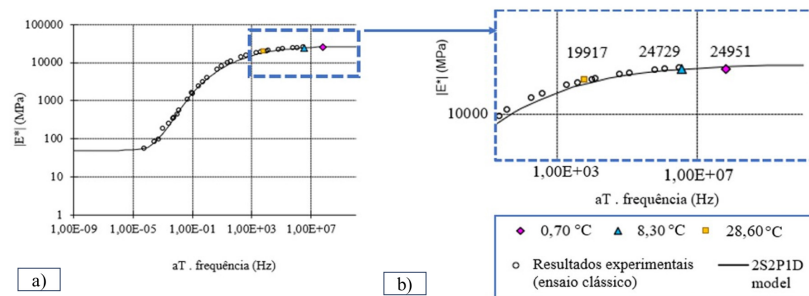


Figura 5. Curva mestra de módulo dinâmico (a), incluindo pontos determinados por ensaio ultrassônico variando o ângulo de fase (b).

## 5. CONCLUSÕES

Foi apresentado o método de aplicação de ensaios ultrassônicos em misturas asfálticas para determinação do módulo dinâmico em três diferentes temperaturas (três amostras da mesma mistura). A técnica de medição do tempo de voo das ondas nas diferentes temperaturas, associada à aplicação do PSTT permitiu a caracterização do módulo dinâmico no ramo das altas frequências das curvas mestras. Os valores de ângulo de fase e de coeficiente de Poisson não podem ser obtidos concomitantemente ao módulo no ensaio ultrassônico, devendo ter seus valores adotados por hipótese, o que é uma limitação da técnica. Análises de sensibilidade sobre as influências dos valores de ângulo de fase e de coeficiente de Poisson mostraram que os erros devidos à adoção de valores por hipótese são inferiores a 9%. Esses erros são aceitáveis e permitem que a técnica seja aplicada como controle tecnológico do valor de módulo em campo, desde que uma análise em laboratório do valor ideal de coeficiente de Poisson a ser adotado seja feita. Caso essa análise preliminar não seja realizada, na faixa de valores de 0,25 a 0,40 para esse parâmetro, os erros são em torno de 40% para altas temperaturas e 30% para baixas temperaturas nos resultados de módulo dinâmico. A simplificação estudada ainda envolve considerar o ângulo de fase nulo e o valor constante de coeficiente de Poisson, que resulta em erros de 8,6% para altas temperaturas e 3,4% para baixas temperaturas, o que é satisfatório, considerando sua variação com temperatura e frequência. Salienta-se que, para a construção da curva mestra, ainda há necessidade de dados experimentais para o cálculo da frequência reduzida, o que também deve ser feito em uma análise preliminar em laboratório. Isso pode ser mitigado com o emprego de fatores de translação tempo-temperatura da caracterização do ligante asfáltico, como foi estudado por Oliveira (2019) e demonstrado ser equivalente aos de misturas asfálticas correspondentes.

Apesar das limitações, este artigo contribuiu com uma proposta metodológica de execução e análise de ensaios ultrassônicos em misturas asfálticas, algo que não é bem estabelecido na literatura e que tem claro potencial de melhoria, conforme demonstrado com os resultados. Espera-se que a mesma possa impactar futuras pesquisas com aplicação a uma maior abrangência de materiais (por exemplo, com faixas granulométricas variadas, agregados diversos, tipos e teores de ligantes também diversos), de maneira a permitir

comparações mais céleres, com ensaios mais simples e menos custosos do que os realizados com prensas hidráulicas.

Além disso, observa-se neste trabalho uma proposta de uso dos ensaios ultrassônicos com ondas P, de maneira a se determinar experimentalmente o valor de módulo dinâmico de misturas asfálticas. Quando essa determinação é feita apenas com a determinação do tempo de voo de um tipo de onda, é necessária uma hipótese não verificada sobre o coeficiente de Poisson para estimação de um valor de módulo, o que limita o uso da técnica para apenas efeitos de comparação entre amostras semelhantes. Na área de concreto de cimento Portland, por exemplo, é comum o uso de ensaios ultrassônicos para determinação de defeitos de concretagem ou para estudos de densidade, o que pode ser melhorado com usos combinados de ondas P e S. O mesmo pode se tornar válido na área de misturas asfálticas, uma vez que esses experimentos fiquem mais populares no meio técnico-científico, o que se espera ser um dos impactos do presente artigo.

Diante da possibilidade de uso do teste ultrassônico como medida de controle tecnológico, os autores sugerem investigar no futuro a validação da realização do teste em amostras extraídas do campo, como um meio para o controle tecnológico. Além disso, sugere-se investigar a possibilidade de realização do ensaio direto na estrutura do pavimento, através de pequenas aberturas de janelas para inserção dos transdutores e teste diretamente no material de revestimento.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (UFC) pelas amostras, ao Laboratório de Materiais de Construção Civil pela disponibilização do equipamento, a CNPq, CAPES e FUNCAP pelas bolsas de mestrado, e, aos colegas, Aline Fialho, Lucas Sasaki e Jorge Lucas pelas sugestões recebidas.

#### REFERÊNCIAS

- AASHTO (2011) T 342: Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). Washington: AASHTO.
- AASHTO (2017) R 35: Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures. Washington: AASHTO.
- ASTM (2016) C597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken: ASTM International.
- Babadopulos, L.F.A.L.; G. Orozco; C. Sauzéat et al. (2019) Reversible phenomena and fatigue damage during cyclic loading and rest periods on bitumen. *International Journal of Fatigue*, v. 124, p. 303-314. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.03.008.
- Babadopulos, L.F.A.L.; L.G.F. Wellington; A.F. Reuber et al. (2014) Avaliação do módulo dinâmico de misturas asfálticas a partir de diferentes modos de carregamento. In *Anais do 21º Encontro de Asfalto*. Rio de Janeiro: IBP, p. 1-12.
- Bernucci, L.B.; L.M.G.D. Motta; J.A.P. Ceratti et al. (2010) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras.
- Carret, J. (2019) *Linear Viscoelastic Characterization of Bituminous Mixtures from Dynamic Tests Back Analysis*. Tese (doutorado). Université of Lyon, Lyon. Disponível em: <<https://inria.hal.science/tel-02170515v2>> (acesso em 26/07/2022).
- Carret, J.C.; H. Di Benedetto e C. Sauzéat (2020) Linear viscoelastic behavior of asphalt mixes from dynamic frequency response functions. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 44, n. 7, p. 1019-1031. DOI: 10.1002/nag.3045.
- Cheeke, J.D.N. (2002) *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. Boca Raton: CRC Press.
- Di Benedetto, H.; B. Delaporte e C. Sauzéat (2007) Three-dimensional linear behaviour of bituminous materials: experiments and modelling. *International Journal of Geomechanics*, v. 7, n. 2, p. 149-157. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:2(149).

- Di Benedetto, H.; C. Sauzéat e J. Sohm (2009) Stiffness of bituminous mixtures using ultrasonic wave propagation. *Road Materials and Pavement Design*, v. 10, n. 4, p. 789-814. DOI: 10.1080/14680629.2009.9690227.
- DNIT (2019) Norma DNIT 416/19 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional De Infraestrutura de Transportes.
- Gudmarsson, A.; N. Ryden; H. Di Benedetto et al. (2015) Complex modulus and complex Poisson's ratio from cyclic and dynamic modal testing of asphalt concrete. *Construction & Building Materials*, v. 88, p. 20-31. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.007.
- Jiang, Z.; J. Ponniah; G. Cascante et al. (2011) Nondestructive ultrasonic testing methodology for condition assessment of hot mix asphalt specimens. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 38, n. 7, p. 751-761. DOI: 10.1139/L11-046.
- Larcher, N.; M. Takarli; N. Angellier et al. (2015) Towards a viscoelastic mechanical characterization of asphalt materials by ultrasonic measurements. *Materials and Structures*, v. 48, n. 5, p. 1377-1388. DOI: 10.1617/s11527-013-0240-0.
- Mandel, J. (1966) *Cours de Mécanique des Milieux Continus* (Mécanique des Solides, vol. 2). Paris: Gauthier-Villars Editeur.
- Mangiafico, S.; L.F.A.L. Babadopulos; C. Sauzéat et al. (2018) Nonlinearity of bituminous mixtures. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, v. 22, n. 1, p. 29-49. DOI: 10.1007/s11043-017-9350-3.
- Mounier, D.; H. Di Benedetto e C. Sauzéat (2012) Determination of bituminous mixtures linear properties using ultrasonic wave propagation. *Construction & Building Materials*, v. 36, p. 638-647. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.136.
- Nguyen, Q.T.; H. Di Benedetto e C. Sauzéat (2015) Linear and nonlinear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, v. 48, n. 7, p. 2339-2351. DOI: 10.1617/s11527-014-0316-5.
- Norambuena-Contreras, J.; D. Castro-Fresno; A. Vega-Zamanillo et al. (2010) Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test. *NDT & E International*, v. 43, n. 7, p. 629-634. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.06.007.
- Oliveira, L.C. (2019) *Efeito dos Períodos de Repouso no Ensaio de Fadiga em Misturas Asfálticas e em Ligantes*. Dissertação (mestrado). Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/51476>> (acesso em 26/07/2022).
- Papazian, H.S. (1962) The response of linear viscoelastic materials in the frequency domain with emphasis on asphaltic concrete. In: *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Michigan: TRB, p. 454-463.
- Silva, L.S.V.; J.B.S. Bastos e J.B. Soares (2022) Efeito do uso de corpos de prova moldados e extraídos na caracterização mecânica de misturas asfálticas. *Transportes*, v. 30, n. 1, p. 2620. DOI: 10.14295/transportes.v30i1.2620.
- Theisen, K.M. (2011) *Estudo de Parâmetros Constitutivos Extraídos de Dados Experimentais no Comportamento de Misturas Asfálticas*. Tese (doutorado). Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/35622>> (acesso em 26/07/2022).
- Williams, M.L.; R.F. Landel e J.D. Ferry (1955) The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *Journal of the American Chemical Society*, v. 77, n. 14, p. 3701-3707. DOI: 10.1021/ja01619a008.