



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

KEILA RODRIGUES RABELO

**CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA LINEAR DE MISTURAS ASFÁLTICAS
POR MEIO DE ENSAIOS ULTRASSÔNICOS**

**FORTALEZA
2022**

KEILA RODRIGUES RABELO

CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA LINEAR DE MISTURAS ASFÁLTICAS POR
MEIO DE ENSAIOS ULTRASSÔNICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.

Coorientador: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R114c Rabelo, Keila Rodrigues.

Caracterização Viscoelástica Linear de misturas asfálticas por meio de Ensaios Ultrassônicos / Keila Rodrigues Rabelo. – 2022.
78 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares..

Coorientação: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos.

1. Ensaios não-destrutivos; 2. Módulo dinâmico; 3. Coeficiente de Poisson; 4. Equação da Onda; 5. Ensaios ultrassônicos.. I. Título.

CDD 388

KEILA RODRIGUES RABELO

CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA LINEAR DE MISTURAS ASFÁLTICAS POR
MEIO DE ENSAIOS ULTRASSÔNICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Aprovada em: ____/____/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Examinador interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Eduardo Cabral Bezerra (Examinador externo)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lélio Antônio Teixeira Brito (Examinador externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

À minha mãe, Dona Mazé.

“A vida vem em ondas como um mar, num indo
e vindo infinito.” (LULU SANTOS, 1983).

AGRADECIMENTOS

Nessa jornada, além do título de mestre, levarei as amizades, algumas pessoas para o resto da vida, algumas pessoas que lembrei sempre por admiração, pelo aprendizado e pelo suporte oferecido. Ficou muito claro que a pós-graduação não é um caminho que se trilha sozinha e, nessa seção, gostaria de expressar meu sentimento de gratidão por algumas pessoas que participaram dessa trajetória, mesmo que remotamente.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Jardel por ter me apresentado o Petran e por ter me incentivado antes e durante o primeiro ano. Agradeço também a elas, tão especiais, que estão sempre com palavras de conforto, às vezes cobranças também, a Annie e a Iolanda.

Ao Professor Heber, a quem admiro muito e que jamais imaginei que iria gostar tanto do trabalho voltar todo riscado de caneta vermelha. Aprendi muito, não só nas disciplinas, mas no estágio à docência também.

À Profa. Suelly, não caberia aqui as palavras para expressar o quanto admiro essa mulher. Eu sempre lembrei das conversas, de todo o incentivo e principalmente da música “Desesperar jamais”.

Gostaria de agradecer ao grupo do LMP, em especial, a Juceline com a qual tive a oportunidade de trabalhar diretamente no Cientista Chefe. Aos colegas que forneceram as amostras, Aline e Raul. Ao Jorge Lucas por estar sempre disposto a ajudar e ao Jorge Luis pela disponibilidade nessa reta final.

Em especial ao Lucas Sassaki, que me ajudou tanto nos ensaios e por ter sido um suporte inimaginável. Nessa última etapa, recebi suporte de uma pessoa muito especial que não conheço muito bem, mas que tenho uma admiração e carinho especial, a Karol Lemos.

A todos os meus colegas que ingressaram junto comigo, que participaram dessa adaptação, em especial, Cecília, Elisa, Haikel, Túlio, Vitor, Jéssica e Thaís. Aos amigos Fabiana e Tiago Aquino, pela parceria até hoje.

Ao meu coorientador, Professor Lucas, cuja genialidade às vezes me assusta em um sentido muito bom. Tenho uma profunda admiração e principalmente, gratidão. Por mostrar que o difícil pode ser simples, mesmo sem ser, mas que de alguma forma, depois de insistir um pouco mais, pode se obter êxito.

Por fim, ao Professor Jorge, que me acolheu sem preconceitos, que acreditou que eu seria capaz deste tema, mesmo tendo algumas alterações de percurso. Eu sou muito grata por tudo, até pelas cobranças e principalmente pelas palavras “Siga com entusiasmo”. De fato, foi uma experiência muito rica ter o professor Jorge e o professor Lucas na orientação.

Agradeço também aos membros da banca examinadora, Professores Lélio Brito, Eduardo Cabral e Heber Lacerda pela disponibilidade para a avaliação do trabalho.

Meus agradecimentos também à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP pela bolsa de mestrado no Programa Cientista Chefe, entre novembro de 2019 e abril de 2021.

RESUMO

Com a evolução da engenharia de pavimentos para métodos cada vez mais mecanicistas de dimensionamento, ensaios não destrutivos de caracterização de propriedades relacionadas ao desempenho serão necessários para o controle e a avaliação de misturas asfálticas em campo. Nesta dissertação, foram aplicados ensaios ultrassônicos em misturas asfálticas com o objetivo de caracterizar o comportamento viscoelástico linear, por meio dos parâmetros conhecidos como módulo dinâmico e coeficiente de Poisson. Os ensaios com pulsos ultrassônicos produzem ondas mecânicas que se propagam em amostras de geometria conhecida. Mede-se o tempo de voo dessas ondas, para cálculo da velocidade das ondas. Para um dado tipo de onda e materiais elásticos lineares isotrópicos, a velocidade depende apenas da massa específica, do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson (Equação da Onda). Conhecendo-se o valor da massa específica e as velocidades calculadas das ondas, tem-se uma equação em função do módulo e do coeficiente de Poisson, com essas duas variáveis dependentes entre si. Tal equação pode ser adaptada para materiais viscoelásticos lineares isotrópicos, com a principal diferença sendo a influência de valores de ângulo de fase na atenuação das ondas. Tipicamente, os ensaios são realizados com transdutores de ondas de compressão (ondas P), e se adotam valores fixos de coeficiente de Poisson para estimar um valor aproximado de módulo (primeira análise). Alternativamente, deve-se produzir uma segunda equação, por meio de medidas com outro tipo de onda, como a de tempo de voo de ondas de cisalhamento (ondas S), de maneira a se determinar o módulo e o coeficiente de Poisson simultaneamente (segunda análise). Os resultados foram sistematicamente validados com aqueles obtidos por meio do ensaio clássico de módulo complexo (DNIT, 2019), cujo valor absoluto é representado por $|E^*|$, calibrados utilizando o modelo reológico 2S2P1D. Foi realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros reológicos requeridos da Equação da Onda, verificando os resultados de $|E^*|$. Foram assumidas hipóteses simplificadoras, que envolvem considerar o ângulo de fase nulo e o valor de coeficiente de Poisson constante e adotado por hipótese (valores de 0,25 a 0,40), que resultaram em erros satisfatórios, considerando as variações de temperatura (28,6°C, 8,3°C e 0,7°C) e a frequência investigada (54kHz). No segundo tipo de análise, estudou-se a obtenção de parâmetros reológicos da mistura, a partir de ensaios de propagação de ondas de Compressão e de Cisalhamento simultaneamente. Observou-se que o tempo de propagação da onda S, desde que determinado adotando-se o valor de tempo de voo até a segunda perturbação, é determinante no valor do coeficiente de Poisson. O processo adotado resultou em erros aceitáveis, pois permite a obtenção do $|E^*|$, sem a necessidade de adoção de valores fixos e não

verificados de coeficiente de Poisson como na primeira análise. Este trabalho contribuiu ao apresentar estratégias de caracterização não-destrutiva de misturas asfálticas que podem ser adaptadas para controle tecnológico e avaliações em campo. Espera-se que com a adoção de métodos cada vez mais mecanicistas se possa evoluir o controle para não apenas avaliações de composição, mas medidas relacionadas ao desempenho, como é o caso do módulo dinâmico de misturas asfálticas.

Palavras-chave: ensaios não-destrutivos; módulo dinâmico; coeficiente de Poisson; equação da onda; ensaios ultrassônicos.

ABSTRACT

With the evolution of pavement engineering towards increasingly mechanistic methods of design, non-destructive tests to characterize properties related to performance will be necessary to control the evaluation of asphalt mixtures in the field. In this dissertation, ultrasonic tests were applied to asphalt mixtures with the objective of characterizing the linear viscoelastic behavior, through the parameters known as dynamic modulus and Poisson's ratio. Ultrasonics velocity pulse tests produce mechanical waves that propagate in samples of known geometry. The waves' flight time is measured to calculate their speed. For a given type of wave and isotropic linear elastic materials, the velocity depends only on the specific gravity, modulus of elasticity and Poisson's ratio (Wave Equation). Knowing the specific gravity value and the calculated waves' velocities, we have an equation as a function of the modulus and the Poisson's ratio, with these two variables dependent on each other. Such an equation can be adapted for isotropic linear viscoelastic materials, with the main difference being the influence of phase angle values on wave attenuation. Typically, tests are performed with compression wave transducers (P waves), and fixed values of Poisson's ratio are adopted to estimate an approximate value of modulus (first analysis). Alternatively, a second equation must be produced, by means of measurements with another type of wave, such as the time of flight of shear waves (S waves), in order to simultaneously determine the modulus and Poisson's ratio (second analysis). The results were systematically validated with those obtained from the classic complex module test (DNIT, 2019), whose absolute value is represented by $|E^*|$, calibrated using the 2S2P1D rheological model. A sensitivity analysis of the required rheological parameters of the Wave Equation was performed, verifying the results of $|E^*|$. Simplifying hypotheses were assumed, which involve considering the null phase angle and the Poisson ratio constant value and adopted by the hypothesis (values from 0.25 to 0.40), which resulted in satisfactory errors, considering variations of temperature (28.6°C, 8.3°C and 0.7°C) and the investigated frequency (54kHz). In the second analysis, it was studied the obtaining of rheological parameters of mixing, from tests of propagation of waves of Compression and Shear simultaneously. It was observed that the propagation time of the S wave, as long as it is properly determined (adopting the value of time of flight until the second perturbation) is decisive in the value of Poisson's ratio. The process adopted resulted in acceptable errors, allowing to obtain the $|E^*|$ without the need to adopt fixed and unverified values of Poisson's ratio, as in the first analysis. This work contributed by presenting strategies for non-destructive characterization of asphalt mixtures that can be adapted for technological control and field evaluations. It is

expected that with the adoption of increasingly mechanistic methods, the control can evolve to evaluate composition, provide measures directly related to performance, as the dynamic modulus of asphalt mixtures.

Keywords: non-destructive tests; stiffness; dynamic modulus; Poisson's ratio; wave equation; ultrasonic testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da dissertação.....	17
Figura 2 – Ensaio de módulo complexo	20
Figura 3 – Ensaio de Módulo de Resiliência.....	21
Figura 4 – Ensaio Ultrassônico.....	22
Figura 5 – Ensaio de Ressonância por Impacto.....	23
Figura 6 – Ensaio de Medição das Funções de Resposta de Frequência (FRFs)	23
Figura 7 – Ensaio de Vibroscopia	24
Figura 8 – Temperaturas aferidas nos CPs com câmera termográfica antes dos pulsos	34
Figura 9 – Execução do teste ultrassônico	35
Figura 10 – Análise no Domínio do Tempo (a) e no Domínio da Frequência (b)	38
Figura 11 – Curva Mestra de Módulo Dinâmico, incluindo pontos determinados por ensaio ultrassônico variando coeficiente de Poisson	41
Figura 12 – Curva Mestra de Módulo Dinâmico, incluindo pontos determinados por ensaio ultrassônico variando o Ângulo de Fase.....	42
Figura 13 – Modos de oscilação (ondas P e S).....	48
Figura 14 – Equipamento Pundit Lab.....	51
Figura 15 – Gráfico Amplitude vs. Tempo de onda P medida no receptor do ultrassom	52
Figura 16 – Gráfico Amplitude vs. Tempo de onda S medida no receptor do ultrassom	53
Figura 17 – Velocidade da onda P – m/s (tempos de voo medidos)	56
Figura 18 – Análise de Fourier	58
Figura 19 – $ E^* $ 50kHz e $ E^* $ 34,4kHz.....	59
Figura 20 – Erros resultantes entre v_{med} e v_{calc}	63
Figura 21 – Resultados de $ E^* _{ondas}$ e $ E^* _{34,4kHz}$	65
Figura 22 – Erros resultantes entre $ E^* _{ondas}$ e $ E^* _{34,4kHz}$	66
Figura 23 – Hipótese do tempo de voo da onda S – Interseção.....	67
Figura 24 – v_{med} VS. v_{const}	68
Figura 25 – Sugestão de geometria para teste ultrassônico em campo	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de Poisson em testes ultrassônicos	31
Tabela 2 – Características das amostras	32
Tabela 3 – Resultados das Medições	37
Tabela 4 – Fatores de deslocamento e Frequências reduzidas	39
Tabela 5 – Parâmetros reológicos.....	39
Tabela 6 – Influência da variação do Coeficiente de Poisson no $ E^* $ em testes ultrassônicos .	40
Tabela 7 – Módulo dinâmico com $\nu = 0,349$ – Teste ultrassônico	42
Tabela 8 – Características das amostras	49
Tabela 9 – Tempos de voo da onda P medidos (μs).....	56
Tabela 10 – C_p 34,4 kHz (m/s).....	58
Tabela 11 – Coeficientes de Poisson calculados (Equação 11).....	60
Tabela 12 – Tempo de voo (μs) e velocidade da onda S (m/s)	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2S2P1D	<i>2 Springs, 2 Parabolic elements, and 1 Dashpot</i>
ϕ	Ângulo de fase
ρ	Massa específica
ν	Coeficiente de Poisson
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
a_T	Fator de deslocamento
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CP	Corpo de prova
C_p	Velocidade da onda
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E^*	Módulo complexo
$ E^* $	Módulo dinâmico
f_R	Frequência reduzida
FRF	Função Resposta de Frequência
GC	Grau de compactação
Gmb	Massa específica aparente da mistura
IR	<i>Impact Resonance</i>
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
ND	Não Destrutivas
PSTT	Princípio da Superposição Tempo-Temperatura
RAS	<i>Resonant Acoustic Spectroscopy</i>
RUS	<i>Resonant Ultrasonic Spectroscopy</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal
TRF	Transformada Rápida de Fourier
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UFC	Universidade Federal do Ceará
UTM-25	<i>Universal Testing Machine</i>
VEL	Viscoelástica linear

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	<i>Estrutura da dissertação</i>	16
1.2	<i>Considerações iniciais</i>	17
1.3	<i>Contextualização.....</i>	19
1.4	<i>Problema de pesquisa e justificativa.....</i>	25
1.5	<i>Objetivos.....</i>	25
1.5.1	<i>Objetivo geral.....</i>	25
1.5.2	<i>Objetivos específicos</i>	26
2	ARTIGO 1: DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DINÂMICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS POR MEIO DE TESTES ULTRASSÔNICOS.....	27
2.1	<i>Resumo</i>	27
2.2	<i>Introdução</i>	27
2.3	<i>Revisão bibliográfica</i>	29
2.3.1	<i>Propagação de ondas em sólidos.....</i>	29
2.3.2	<i>Módulo dinâmico de misturas asfálticas por meio de ensaios ultrassônicos</i>	30
2.4	<i>Materiais e métodos.....</i>	32
2.4.1	<i>Características das amostras</i>	32
2.4.2	<i>Ensaio quase-estático cíclico de compressão axial</i>	33
2.4.3	<i>Ensaio de propagação de pulso ultrassônico.....</i>	33
2.4.3.1	<i>Calibração do sistema e análise de atraso do sinal</i>	33
2.4.3.2	<i>Controle da temperatura da amostra</i>	33
2.4.3.3	<i>Configuração do teste ultrassônico</i>	34
2.4.3.4	<i>Determinação da velocidade de propagação da onda de compressão</i>	35
2.4.3.5	<i>Análise espectral: estudo no domínio da frequência.....</i>	36
2.4.3.6	<i>Definição da frequência reduzida</i>	36
2.5	Resultados e discussões	36
2.5.1	<i>Medição direta do tempo de voo e velocidade da onda de compressão.....</i>	36
2.5.2	<i>Definição das variáveis da Equação da 2</i>	37
2.5.3	<i>Análise no domínio da frequência</i>	38
2.5.4	<i>Frequência reduzida</i>	39
2.5.5	<i>Ângulo de fase e coeficiente de Poisson</i>	39
2.5.6	<i>Análises de sensibilidade dos parâmetros reológicos</i>	40
2.5.6.1	<i>Influência da variação do coeficiente de Poisson nos valores de E^*</i>	40

2.5.6.2 <i>Influência da variação do Ângulo de fase nos valores de E^*</i>	41
2.6 Conclusões	43
3 ARTIGO 2: ENSAIOS ULTRASSÔNICOS COM ONDAS DE COMPRESSÃO E DE CISALHAMENTO APLICADOS NA CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS	45
3.1 Resumo	45
3.2 Considerações iniciais	46
3.3 Revisão de literatura: propagação de ondas em sólidos	47
3.4 Materiais e métodos	49
3.4.1 Características das amostras	49
3.4.2 Determinação do Módulo Dinâmico por ensaios quase-estáticos	50
3.4.3 Determinação do módulo dinâmico por ensaios de propagação de pulsos ultrassônicos	50
3.4.3.1 Medição do tempo de voo	51
3.4.3.2 Compatibilização das frequências	53
3.4.3.3 Obtenção do coeficiente de Poisson (ν)	54
3.5 Resultados e discussões	55
3.5.1 Medida direta do tempo de voo e da velocidade da onda de compressão (onda P)	56
3.5.2 Frequências características	57
3.5.3 Compatibilização de frequências	58
3.5.4 Medida direta do tempo de voo e da velocidade da onda de cisalhamento (onda S)	59
3.5.5 Obtenção do módulo dinâmico com os valores de v_{med}	64
3.5.6 Estudo dos valores v_{med} comparados ao coeficiente de Poisson constante	67
3.6 Conclusões	69
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
4.1 Conclusões	71
4.2 Recomendações de trabalhos futuros	73
REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é iniciada por um capítulo introdutório que contextualiza o tema proposto, apresentando de forma bastante resumida as técnicas não destrutivas estudadas em países como França, Suécia e Estados Unidos. Além disso, o capítulo introdutório traz o problema de pesquisa e os objetivos geral e específicos.

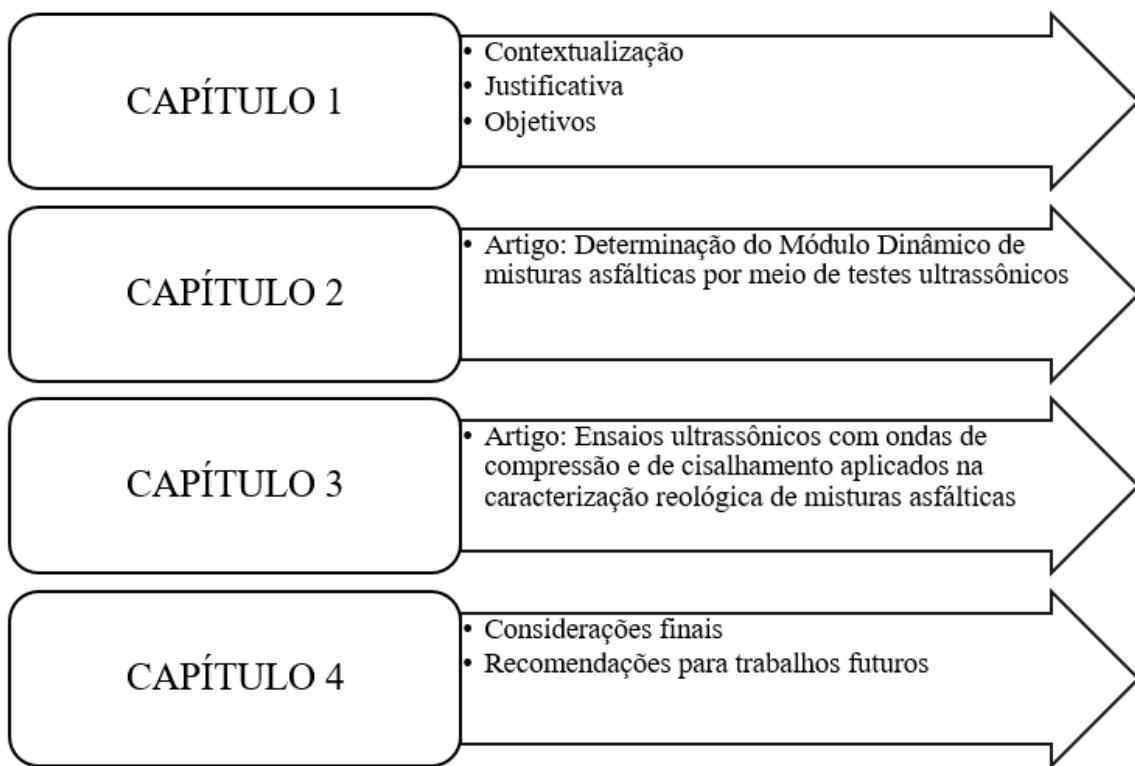
O desenvolvimento da dissertação por meio de 2 capítulos, Capítulos 2 e 3, construídos em formato de artigo científico, utilizam as equações com os resultados do teste ultrassônico de diversas formas.

O Artigo 1 apresenta o estudo do módulo dinâmico e outros parâmetros reológicos, calculados e/ou assumidos por meio do resultado do tempo percorrido pela onda ultrassônica na amostra de mistura asfáltica. Os resultados das diversas repetições de ensaios ultrassônicos foram somados aos resultados do ensaio convencional de módulo dinâmico (DNIT, 2019). Este artigo foi publicado nos anais do 34º Congresso de Pesquisa da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET em 2020.

O Artigo 2, recentemente submetido à revista Transportes, busca caracterizar misturas asfálticas por meio de ondas ultrassônicas de compressão e cisalhamento. A partir dos resultados dos tempos de voo das ondas S, associados aos tempos de voo das ondas P, são obtidos simultaneamente os valores de coeficiente de Poisson e de módulo dinâmico. Os ensaios são realizados em diversas temperaturas, sendo então avaliado como deve ser determinado o tempo de voo para uma adequada caracterização da mistura asfáltica.

Neste formato de dissertação é possível que o leitor encontre alguma duplicidade de texto, tendo este aspecto sido minimizado ao máximo pela autora. A dissertação é finalizada com o Capítulo 4, de conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Embora os capítulos apresentados como artigos científicos tenham suas próprias seções de conclusões, no capítulo final são apresentadas as considerações finais de modo a possibilitar o leitor uma forma resumida da contribuição da pesquisa realizada no presente mestrado. A Figura 1 apresenta uma descrição da estrutura da dissertação.

Figura 1 – Estrutura da dissertação



Fonte: Autora (2022)

1.2 Considerações iniciais

A caracterização de parâmetros de rigidez de materiais pode ser feita por diferentes técnicas, destrutivas e não destrutivas (ND). Com a adoção de filosofias cada vez mais mecanicistas para o projeto e o dimensionamento de estruturas de pavimentos, técnicas que meçam propriedades relacionadas ao desempenho serão cada vez mais necessárias para o controle tecnológico e para a avaliação em campo dos materiais. Quanto à rigidez, a principal propriedade das misturas asfálticas é o módulo complexo (E^*), que consiste em um número complexo, definido por um valor absoluto ($|E^*|$) e por um ângulo de fase (ϕ). O valor de E^* é classicamente obtido a partir de um ensaio quase-estático (DNIT, 2019), que requer prensas servo-controladas indisponíveis para estudos em campo. Este contexto motivou o presente trabalho, focado em técnicas de ensaios não destrutivos para aferição de $|E^*|$ baseados em propagação de ondas ultrassônicas.

Na construção civil, as técnicas baseadas em ensaios ultrassônicos são aplicadas principalmente para a aferição da qualidade do concreto. Isso pode ser feito tanto por meio de medidas indiretas para o estudo da resistência do concreto de cimento Portland (quando o ensaio é executado em corpos-de-prova de laboratório), quanto para detecção de falhas de concretagem

(quando o ensaio é executado em estruturas em campo). Para a aferição da qualidade, estima-se normalmente a resistência à compressão a partir de correlações com o módulo de elasticidade do concreto. O módulo, por sua vez, é estimado a partir da velocidade de propagação de ondas mecânicas no material, que deriva diretamente da medida de fato efetuada, que é a do tempo de voo de ondas ultrassônicas (tipicamente apenas ondas P, de compressão). Para esse processo de estimativa do módulo, hipóteses de elasticidade linear, de isotropia, de homogeneidade, entre outras, são necessárias. Particularmente, no caso de testes longitudinais de ondas de compressão, um valor de coeficiente de Poisson deve ser adotado, que normalmente não é verificado experimentalmente. Essa deficiência pode ser vencida se testes com outras ondas forem efetuados, como o de propagação de ondas S, de cisalhamento.

Já na área de pavimentação, nas últimas décadas, buscou-se adaptar técnicas ND às misturas asfálticas para determinação do parâmetro de rigidez denominado “Módulo Dinâmico” ou $|E^*|$ (DI BENEDETTO *et al.*, 2009; NORAMBUENA-CONTRERAS *et al.*, 2010; MOUNIER *et al.*, 2012; LARCHER *et al.*, 2015). Sublinha-se que, em áreas mais fundamentais de mecânica dos materiais, o termo módulo dinâmico costuma ser reservado para a caracterização de rigidez com propagação de ondas (efeitos dinâmicos de inércia do material) e que o termo “valor absoluto do módulo complexo” seria mais adequado para o $|E^*|$ obtido classicamente por ensaios quase-estáticos (HUANG E DI BENEDETTO, 2015). Ainda assim, é comum o emprego do termo “Módulo Dinâmico” para o $|E^*|$ em misturas asfálticas, independentemente se é obtido classicamente ou com propagação de ondas. Neste texto, foi buscada diferenciação entre os termos “módulo dinâmico” (resultado dos ensaios de propagação de ondas) e “valor absoluto do módulo complexo” (resultado dos ensaios quase-estáticos).

Em misturas asfálticas, $|E^*|$ e ϕ descrevem o comportamento viscoelástico do material. Por outro lado, podem surgir divergências entre os métodos ND e os ensaios clássicos (DNIT, 2019) devido à complexidade do material e à forma de propagação das ondas, além das adaptações de variáveis no equacionamento que relaciona os parâmetros reológicos à velocidade de propagação no material.

Jiang *et al.* (2011) relatam que as altas frequências dos testes ultrassônicos (geralmente acima de 50kHz) podem dificultar a verificação do $|E^*|$ próximo a valores geralmente encontrados, pois a caracterização convencional costuma ser realizada numa faixa de frequências entre 0,1 e 25Hz (AASHTO, 2011; DNIT, 2019). Por outro lado, há duas considerações. A primeira é sobre o princípio da superposição tempo-temperatura, que permite associar efeitos de aumentos de frequência a efeitos de reduções de temperatura, o que mitigaria

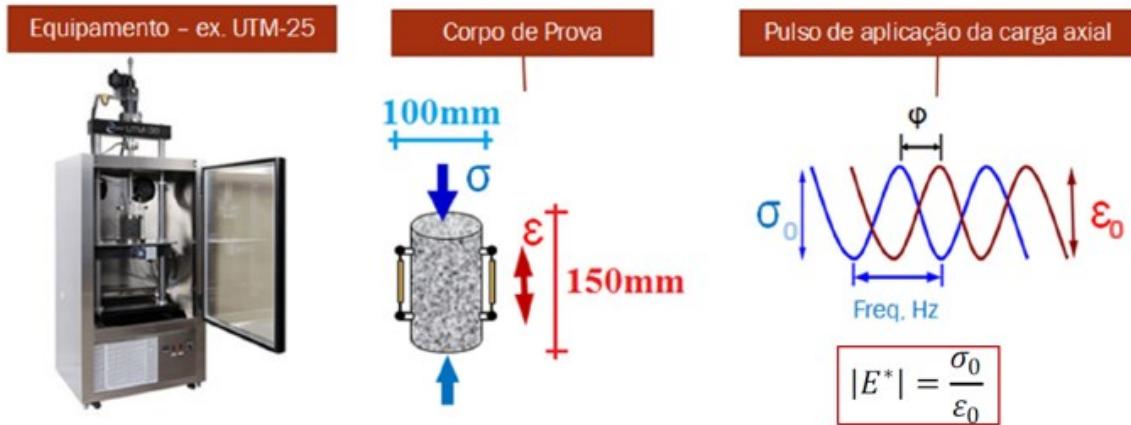
o problema mencionado. A segunda é que o ensaio ultrassônico causa deformações abaixo de 10^{-6} m/m (MOUNIER *et al.*, 2012), permitindo a caracterização viscoelástica linear (VEL) de misturas asfálticas, cujo comportamento é verificado para deformações da ordem de 10^{-5} m/m ou menos (MANGIAFICO *et al.*, 2017). Ensaios clássicos costumam ser realizados com deformações de algumas dezenas de 10^{-5} m/m e podem ter pequenos efeitos de não linearidade (MANGIAFICO *et al.*, 2017).

A evolução dos métodos de dimensionamento de pavimentos brasileiros, com considerações de parâmetros de rigidez das diferentes camadas, torna necessária a determinação destas rigidezes tanto em laboratório quanto em campo, havendo formas alternativas de obtenção das mesmas. Para dimensionamentos expeditos, no caso das subcamadas, há modelos que fornecem a rigidez de solos a partir de propriedades mais simples (RIBEIRO, 2016). Enquanto isso, no caso de misturas usadas nos revestimentos, é ampla a bibliografia da tentativa de obter o módulo dinâmico a partir de parâmetros do ligante e da volumetria das misturas (GOUVEIA, 2016; GOUVEIA *et al.*, 2018). Ainda assim, para projetos de maior importância a estimativa dos parâmetros de rigidez não pode substituir a determinação experimental. Então, novas formas de obtenção facilitada de módulo dinâmico são sistematicamente investigadas uma vez que permitem o uso prático deste parâmetro como *input* de métodos mecanístico-empíricos, e, em campo, podem ser úteis para o controle tecnológico.

1.3 Contextualização

O valor absoluto do módulo complexo ($|E^*|$) é o parâmetro de rigidez que descreve o comportamento viscoelástico de misturas asfálticas em pavimentos, assumido em países como a França desde a década de 1960 e nos Estados Unidos desde a década de 1990. Na literatura no Brasil e nos Estados Unidos, costuma ser tratado pelo termo “módulo dinâmico”, apesar da ausência de efeitos inerciais. Trata-se de um parâmetro de entrada nos métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos de pavimentos asfálticos (HUANG, 2004; SPECHT *et al.*, 2017; SANTIAGO *et al.*, 2020). O módulo complexo, além de sua magnitude ($|E^*|$), apresenta também um ângulo de fase (ϕ). A Figura 2 ilustra o método experimental de caracterização de rigidez de misturas asfálticas por meio dos ensaios de $|E^*|$.

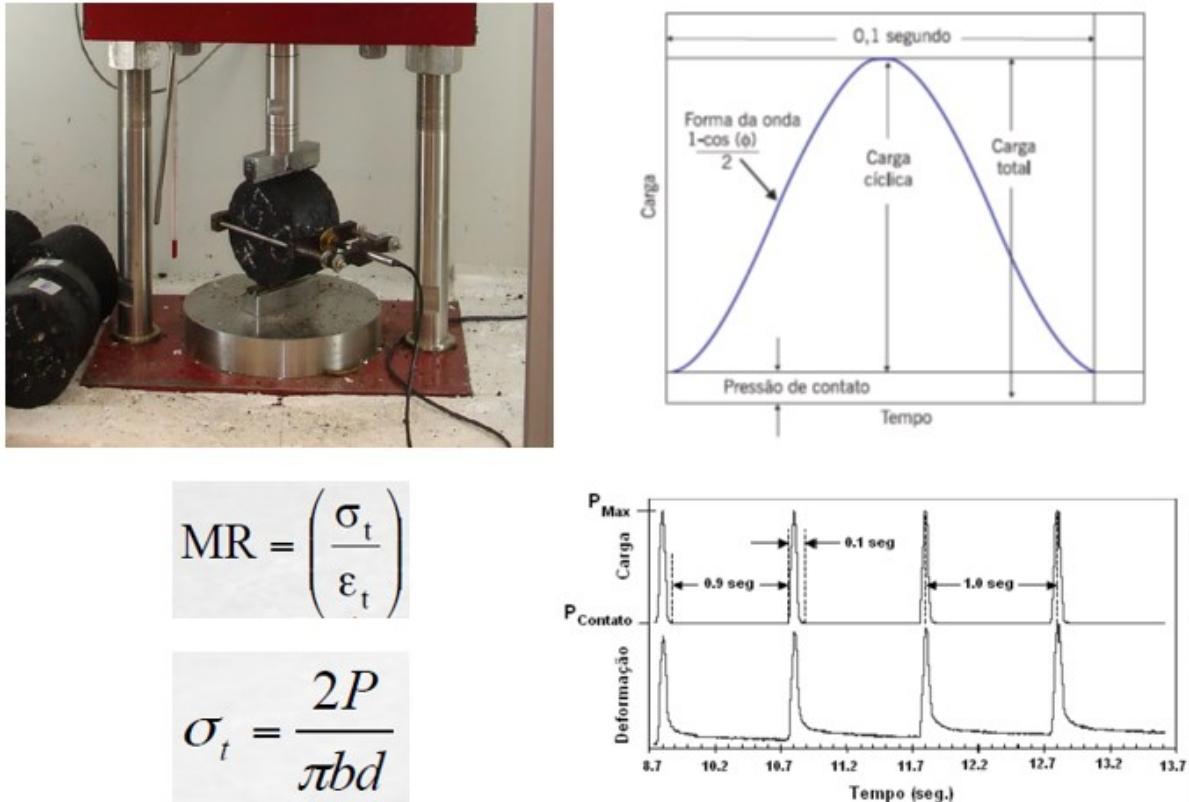
Figura 1 – Ensaio de módulo complexo



Fonte: Adaptado de Gouveia (2016)

No Brasil, o $|E^*|$ como parâmetro caracterizador da rigidez de misturas (DNIT, 2019) é utilizado principalmente em universidades e concessões de rodovias particulares (GOUVEIA, 2016). Apesar de estar em processo de consolidação no Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (MOTTA *et al.*, 2018; SANTOS, 2020), neste momento o método de dimensionamento de pavimentos rodoviários ainda apresenta a rigidez de misturas amparada na análise elástica linear pelo Módulo de Resiliência (DNIT, 2018), ilustrado na Figura 3.

Figura 2 – Ensaio de Módulo de Resiliência



Fonte: Adaptado de Bernuci *et al.* (2010) e Dnit-ME 135 (2018)

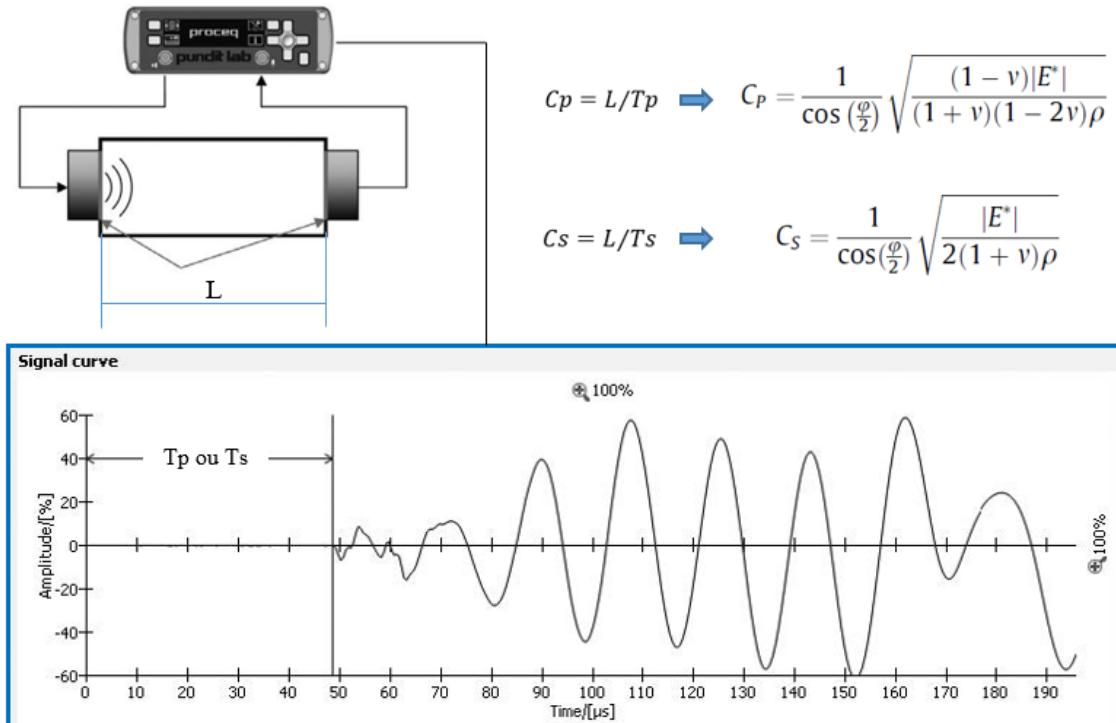
Além desses métodos, há a possibilidade do uso das equações de previsão do $|E^*|$. A Equação 1 apresenta um método semiempírico, por meio de uma equação de previsão estudada, tendo como dados de entrada, o módulo complexo do ligante asfáltico $|G^*|$ e volume de vazios (Vv). A Equação 1 foi elaborada com base em um banco de dados com 24 misturas asfálticas brasileiras (GOUVEIA *et al.*, 2018).

$$\log |E^*| = 1,811 + \frac{2,908}{1+e^{0,763-22,59Vv-0,757\log(|G^*|)}} \quad (1)$$

Tendo em vista a importância do $|E^*|$ e a necessidade de facilitar a análise experimental apropriada ao comportamento viscoelástico de misturas asfálticas nas últimas décadas, o presente trabalho propôs buscar a adaptação de técnicas Não Destrutivas (ND) que já eram consagradas na construção civil (ASTM, 2016; ASTM, 2015). Essas técnicas consistem em ensaios de propagação de ondas ultrassônicas e análises de vibrações. Ressalta-se que cada ensaio fornece um único resultado que é o tempo de voo (tempo de propagação da onda no interior da amostra), o qual é utilizado como entrada para o cálculo da velocidade de propagação da onda, que por sua vez é relacionada a propriedades de rigidez e permite estimá-las. Em

resumo, os ensaios ultrassônicos (Figura 4) relacionam diretamente a velocidade de propagação do tipo de onda emitido com as propriedades reológicas, como foi discorrido nos capítulos seguintes.

Figura 3 – Ensaio Ultrassônico



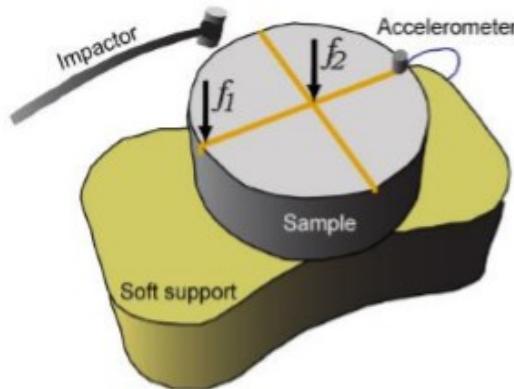
Fonte: Adaptado de Pundit Lab (2017)

Os ensaios baseados em análise de vibrações, por sua vez, consistem em medir as frequências naturais (ressonantes) do material, as quais variam com o modo de vibração, geometria, densidade e propriedades do material. No caso, para materiais viscoelásticos lineares isotrópicos, as propriedades consideradas são comumente o $|E^*|$ e o coeficiente de Poisson (CARRET, 2019) ou outra combinação de parâmetros de viscoelasticidade (THEISEN, 2011).

Os ensaios de Ressonância por Impacto (*Impact Resonance – IR*) apresentam a limitação geral na adaptação dos métodos *Resonant Ultrasonic Spectroscopy* (RUS) e *Resonant Acoustic Spectroscopy* (RAS) às misturas asfálticas, a qual tem sido definir o $|E^*|$ em várias frequências a cada temperatura de ensaio. Esta limitação também está presente nos ensaios ultrassônicos. Além disso, a avaliação dos resultados dos ensaios baseados em análise de vibrações, são fundamentados em modelos matemáticos, dependentes da geometria e dos modos de vibração limitados para a definição das frequências ressonantes e, consequentemente, valores limitados de $|E^*|$. Ademais, a limitação na construção da curva mestra se deve ainda à

obtenção experimental dos fatores de ajuste de trasladação da curva do ensaio convencional (GUDMARSSON, 2014). O esquema do ensaio é ilustrado na Figura 5.

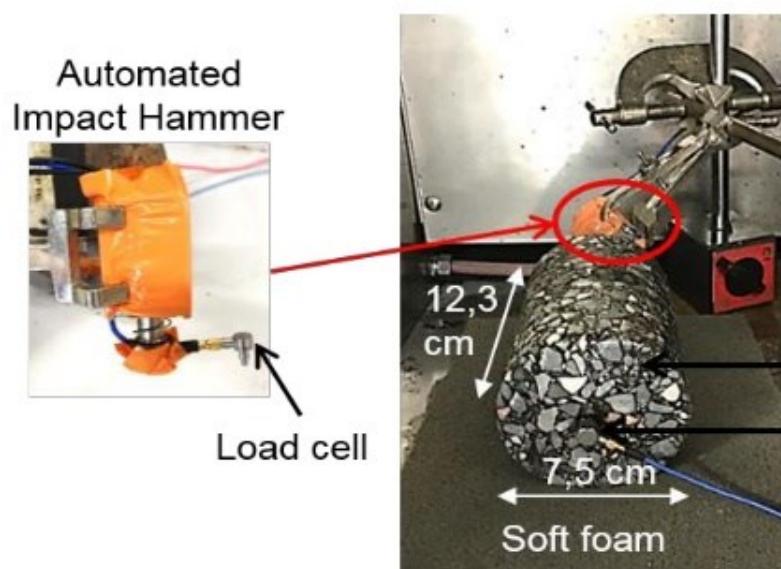
Figura 4 – Ensaio de Ressonância por Impacto



Fonte: Ryden (2011)

Com base nessas dificuldades, Gudmarsson (2014) e Carret (2019) desenvolveram um método baseado no uso das funções de transferência, por meio de um martelo de impacto equipado com uma célula de carga produz uma vibração na superfície da amostra (Figura 6). Essas funções são denominadas Funções de Resposta de Frequência (FRF), as quais representam a razão entre os sinais da saída (aceleração) e os sinais da entrada (força), calculadas a partir dos sinais no domínio da frequência registrados pelo sistema.

Figura 5 – Ensaio de Medição das Funções de Resposta de Frequência (FRFs)



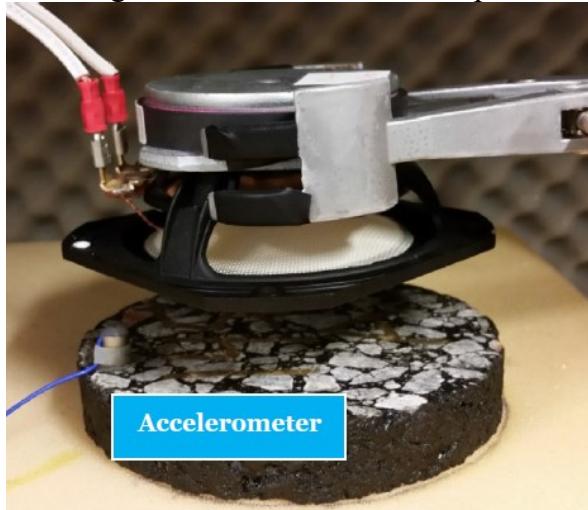
Fonte: Carret (2019, 2020)

Durante o referido ensaio, o impacto é produzido 5 vezes para cada temperatura de teste (-10°C, 0°C, 10°C e 20°C). A medição é realizada por um acelerômetro fixado na amostra. O martelo e o acelerômetro são ligados a um condicionador de sinal conectado a um sistema de aquisição de dados. Esse sistema é responsável por converter os sinais de entrada e saída do domínio do tempo para o domínio da frequência (transformada de Fourier). Posteriormente, é analisada a qualidade do sinal emitido, para garantir que não tenha havido interferência para definir as FRFs.

Os resultados experimentais de FRFs permitem a análise teórica por meio da modelagem tridimensional da vibração do sólido em software de elementos finitos, em que os parâmetros de um modelo viscoelástico linear determinam a vibração daquele sólido em uma ampla gama de frequências.

Por fim, no ensaio de vibroscopia (BEKELE *et al.*, 2019) as medições das frequências ressonantes das amostras são realizadas usando um método de ressonância automatizada sem contato. Essas medições são baseadas na simetria axial fundamental do modo de vibração. O esquema de ensaio é ilustrado na Figura 7.

Figura 6 – Ensaio de Vibroscopia



Fonte: Bekele *et al.* (2019)

Apesar de avanços nos estudos de ensaios ND e suas aplicações às misturas asfálticas, essas técnicas ainda não abrangem o controle tecnológico do $|E^*|$ em campo. Diante disso, nesta pesquisa, optou-se pelo estudo de ondas ultrassônicas devido ao uso deste tipo de equipamento ser de fácil manuseio e pela sua portabilidade, além de fácil tratamento de dados para fins de obtenção dos parâmetros reológicos módulo dinâmico e coeficiente de Poisson em laboratório, possibilitando mais rapidamente futuras aplicações em campo.

1.4 Problema de pesquisa e justificativa

Nos países que empregam o $|E^*|$ para caracterização da rigidez de misturas asfálticas usadas em pavimentos, persistem as dificuldades de obtenção experimental do parâmetro, particularmente em campo. Dentre as dificuldades, destacam-se o alto custo dos equipamentos experimentais (prensas hidráulicas), a necessidade de mão de obra qualificada e o tempo de execução do ensaio, que se estende por cerca de 20h devido à necessidade de estabilização de 5 temperaturas, para 6 frequências distintas de carregamento, em 3 amostras, o que vem sendo apontado como limitador do seu uso em larga escala no meio prático.

Para determinados tipos de projeto, sobretudo aqueles mais simples, o $|E^*|$ também pode ser obtido de forma indireta, por meio de equações de previsão (Equação 1). Apesar dessa simplificação, as equações precisam ser calibradas com dados experimentais (GOUVEIA *et al.*, 2018). Uma vez que $|E^*|$ passa a ser baseado em resultados de materiais anteriormente testados, a qualidade da previsão do parâmetro fica condicionada a quão abrangente é a base de dados e a se o material cuja rigidez será prevista possui similaridades com aqueles contidos na referida base.

Ademais, migrando-se para parâmetros de rigidez mais fundamentais no dimensionamento, surgirá naturalmente a necessidade de controle tecnológico que permita apreciar minimamente essa propriedade em campo, para além dos usuais parâmetros de controle, i.e., densidade, teor de ligante e granulometria.

Nesse contexto, percebe-se que adaptar métodos ND existentes, baseados em propagação de ondas, ao estudo de misturas asfálticas, pode ser uma alternativa simples, de baixo custo e promissora para a pavimentação rodoviária nos cenários de campo e de laboratório.

1.5 Objetivos

1.5.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral da presente pesquisa é avaliar métodos de caracterização de dois parâmetros reológicos de misturas asfálticas, módulo dinâmico e coeficiente de Poisson, em laboratório por meio de ensaios ultrassônicos.

1.5.2 Objetivos específicos

A partir da proposição do objetivo geral foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) comparar resultados de caracterização de rigidez de misturas asfálticas por meio do módulo dinâmico obtido convencionalmente e a partir de ensaios ultrassônicos;
- b) realizar a análise de sensibilidade dos parâmetros reológicos requeridos na equação de comportamento da onda em material viscoelástico;
- c) demonstrar a possibilidade de caracterizar o coeficiente de Poisson de misturas asfálticas por meio de ondas de cisalhamento combinadas às ondas de compressão;
- d) caracterizar módulo dinâmico e coeficiente de Poisson de misturas asfálticas com os resultados de velocidades de ondas de compressão e cisalhamento, sem a necessidade de hipótese simplificadora sobre o valor do ângulo de fase.

2 ARTIGO 1: DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DINÂMICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS POR MEIO DE TESTES ULTRASSÔNICOS

2.1 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.

Palavras-chaves: teste ultrassônico, propagação onda P, viscoelasticidade, mistura asfáltica, módulo dinâmico

2.2 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 50kHz) 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 25Hz (AASHTO T 342, 2011; DNIT-ME 416, 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 *et al.*, 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 mecanístico 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 capítulo visou 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 (v^*) e do ângulo de fase (ϕ) nos resultados de $|E^*|$ obtido por um processo de retroanálise.

2.3 Revisão bibliográfica

Os parâmetros reológicos que governam o comportamento viscoelástico linear nas misturas asfálticas no domínio da frequência são o Módulo complexo (E^*) e o coeficiente de Poisson complexo (ν^*). O E^* relaciona as amplitudes e o atraso (medido pelo ângulo de fase – ϕ) 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 ν . No Brasil, a determinação experimental do coeficiente de Poisson de misturas asfálticas ainda não é uma realidade nem mesmo 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 cílicos axiais, comumente de compressão, por simplicidade de execução (AASHTO T 342, 2011; DNIT-ME 416, 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 *et al.*, 1955).

2.3.1 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 asfálticos não tem, portanto, 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 (CHEEKE, 2002; ASTM C597, 2016).

2.3.2 *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 (ρ), de ângulo de fase (ϕ) e de coeficiente de Poisson (ν) (DI BENEDETTO *et al.*, 2009; NORAMBUENA-CONTRERAS *et al.*, 2010; MOUNIER *et al.*, 2012; LARCHER *et al.*, 2015). A Equação 2 (MANDEL, 1966) expressa a relação das variáveis supracitadas, em que C_P é a velocidade de propagação do pulso de ondas P, de compressão.

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

O método de obtenção dos valores de ν e ϕ diverge entre autores. Di Benedetto *et al.* (2009) obtiveram ν de forma experimental, por meio de testes cíclicos, baseados em Di Benedetto *et al.* (2007), medindo o deslocamento radial nos ensaios de tração-compressão. Os autores ainda apontam que o erro produzido pela estimativa de ν 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 ν como uma constante e os ϕ resultantes do ensaio clássico. Por fim, Mounier *et al.* (2012) ajustaram os resultados experimentais de $|E^*|$

com o modelo reológico 2S2P1D, e, assim, obtiveram v e ϕ . 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 <i>et al.</i> (2009)	0,15 a 0,35	-19°C; 26°C; 40°C
Norambuena-Contreras <i>et al.</i> (2010)	0,36	22°C
Mounier <i>et al.</i> (2012)	0,15 a 0,35	-19°C a 40°C
Larcher <i>et al.</i> (2015)	0,36	-20°C a 40°C

Fonte: Di Benedetto *et al.* (2009), Norambuena-Contreras *et al.* (2010), Mounier *et al.* (2012), Larcher *et al.* (2015)

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 *et al.* (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.*, 2015; Nguyen *et al.*, 2018; Babadopoulos *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 1Hz), 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 *et al.* (2012) obtiveram erros de 32% e para as demais temperaturas os erros estiveram em torno de 20%. Para ensaios a 42°C, Di Benedetto *et al.* (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 10kHz (Di Benedetto *et al.*, 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 *et al.*, 2009; Mounier *et al.*, 2012; Larcher *et al.*, 2015). Para uma caracterização mais ampla do espectro de frequências, são necessárias técnicas mais avançadas, que não serão abordadas aqui (Gudmarson *et al.*, 2015; Carret *et al.*, 2020).

2.4 Materiais e métodos

2.4.1 Características das amostras

A Tabela 2 apresenta as características físicas das amostras investigadas. A dosagem foi realizada de acordo com o método Superpave (AASHTO R 35, 2017), visando à obtenção de uma mistura asfáltica com Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 12,5mm 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 ³)	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

Fonte: Autora (2020)

As normas AASHTO R 35 (2017) e AASHTO T 342 (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 entre 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.

2.4.2 Ensaio quase-estático cíclico de compressão axial

O ensaio quase-estático cíclico realizado nas amostras de mistura asfáltica consiste no ensaio convencional de módulo complexo na prensa hidráulica UTM-25. O ensaio segue as recomendações da AASHTO T 342 (2011) e DNIT-ME 416 (2019) com frequências de carregamento: 0,1Hz; 0,5Hz; 1Hz; 5Hz; 10Hz; 25Hz, 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-ME 416 (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.

2.4.3 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 50mm de diâmetro, que trabalham a uma frequência nominal de 54kHz. 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 0,5μs.

2.4.3.1 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 0,00μs, ou seja, sem qualquer atraso na emissão do sinal do equipamento.

2.4.3.2 Controle da temperatura da amostra

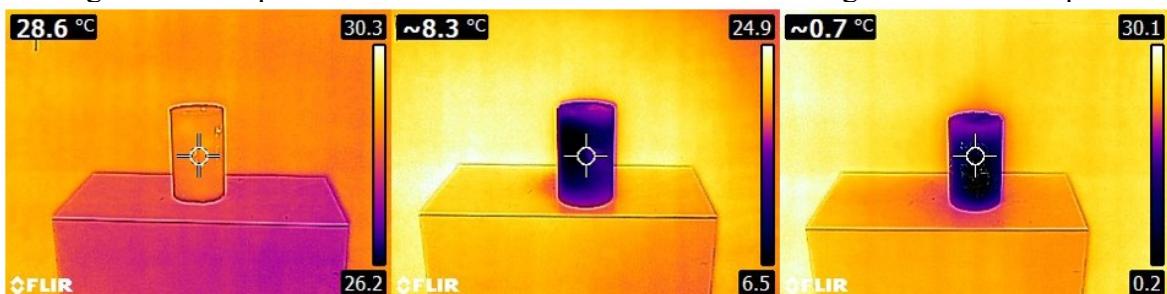
Para verificar a temperatura das amostras antes do teste ultrassônico (permitindo-se adequada avaliação do fator de translação de acordo com o PSTT) foi utilizada uma câmera

termográfica. O referido equipamento capta apenas as temperaturas de superfície do corpo-de-prova (CP), conforme apresentado na Figura 8. 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 de forma considerável. 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 8 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 5h em câmara térmica para atingir a temperatura superficial de 8,3°C;
- 3º CP foi mantido em câmara térmica por um período de 10h para atingir a temperatura aferida de 0,7°C.

Figura 8 – Temperaturas aferidas nos CPs com câmera termográfica antes dos pulsos



Fonte: Autora (2020)

2.4.3.3 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 recebido pelo 2º transdutor (receptor), mostrados na Figura 9. 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 2 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 9 – Execução do teste ultrassônico



Fonte: Autora (2020)

2.4.3.4 Determinação da velocidade de propagação da onda de compressão

Foram aplicados 5 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 3). Posteriormente, os valores da velocidade de onda são utilizados para calcular o $|E^*|$ da mistura asfáltica, a partir da Equação 4 (obtida a partir da Equação 2). Para utilizá-la, deve-se assumir por hipótese os valores de ϕ e v , sendo essa escolha discutida adiante quando da apresentação dos resultados da pesquisa.

$$C_p = L/T_p \quad (3)$$

$$|E^*| = C_p^2 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \rho \frac{(2v-1)(v+1)}{(v-1)} \quad (4)$$

2.4.3.5 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).

2.4.3.6 Definição da frequência reduzida

A frequência reduzida (fr) pode ser obtida por meio da Equação 5 (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 6).

$$fr = f \times a_T \quad (5)$$

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (6)$$

A metodologia utilizada para determinação dos fatores de ajuste (α_T) das amostras se baseou na equação (Equação 5) de Williams, Landel e Ferry (WILLIAMS *et al.*, 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).

2.5 Resultados e discussões

2.5.1 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 5 leituras. Os valores de tempo de voo indicam que o teste mostrou boa repetibilidade.

2.5.2 Definição das variáveis da Equação da 2

Em resumo, as variáveis da Equação 2 foram obtidas da seguinte forma:

- massa específica das amostras (ρ) 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 3;
- ângulo de fase (ϕ) 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 (v), obtido pela Equação 4, 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 v precisaria ser adotado por hipótese, e o valor obtido nessa etapa corresponde aquele que melhor ajusta a Equação 4 com o valor de $|E^*|$ proveniente dos ensaios clássicos. Isso foi feito para evitar o efeito do valor de v adotado no erro medido, algo estudado em mais detalhe através de um estudo paramétrico;
- por fim, após as definições das variáveis anteriores, é possível calcular $|E^*|$ por meio da Equação 4.

Tabela 2 – Resultados das Medições

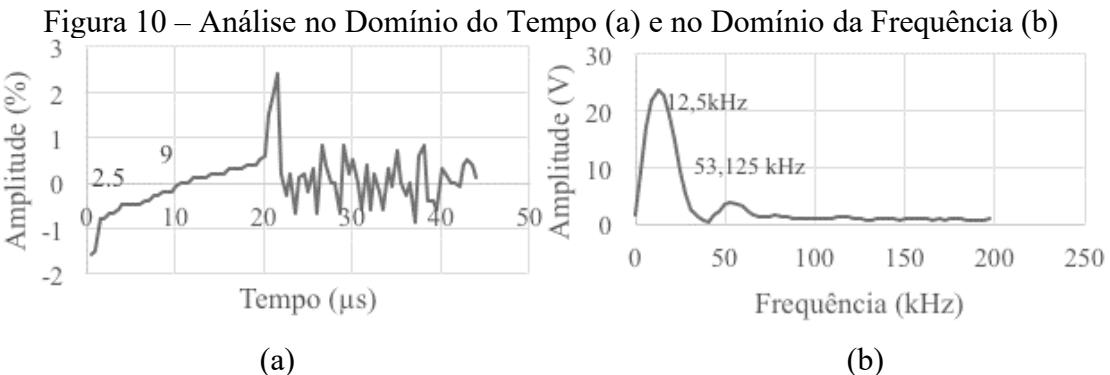
Amostra	1	2	3
Temperatura (°C)	28,6	8,3	0,7
Leitura	Tempo de voo (μs)	C_p (m/s)	Tempo de voo (μs)
1	43,7	3730	39,4
2	43,7	3730	39,7
3	43,2	3773	38,0
4	43,2	3773	38,7
5	43,2	3773	40,0
Média	43,4	3756	39,2
Desvio Padrão	0,2	20,7	0,6
CV (%)	0,6	0,6	1,7
			1,7
			0,7
			0,7

Fonte: Autora (2020)

Os resultados da Tabela 3 mostram uma boa repetibilidade nas 5 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 et al. (2009), para a velocidade de onda P (Cp), 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 Cp são próximos e menores do que 1%, assim como encontrado no presente artigo.

2.5.3 Análise no domínio da frequência

Foi realizada a análise de Fourier dos sinais gravados do receptor, considerando a disposição do equipamento como na Figura 9, para todas as leituras. Como discorrido anteriormente, a TRF fornece uma média do conteúdo de frequência durante toda a emissão do sinal. A Figura 10a ilustra a curva do sinal no domínio do tempo, enquanto a Figura 10b apresenta a amplitude máxima do sinal correspondente a cada valor de frequência característica.



Fonte: Autora (2020)

Observa-se na Figura 10b que existem dois picos de amplitude máxima, em frequências distintas. A frequência do transdutor é de 54kHz, e, esse pico de frequência de 12,5kHz 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 53,125kHz, correspondente ao valor aproximado da frequência emitida. Essa frequência foi utilizada no cálculo da frequência reduzida e na montagem da curva mestra a partir dos resultados de ensaios ultrassônicos.

2.5.4 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 6). Posteriormente, calcula-se a frequência reduzida (fr) a partir da frequência resultante da TRF (Equação 5) que é de 53,125kHz. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 – Fatores de deslocamento e Frequências reduzidas

Parâmetro	Valores		
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

Fonte: Autora (2020)

2.5.5 Ângulo de fase e coeficiente de Poisson

Os ângulos de fase (ϕ) 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 ϕ e $|E^*|$, foram empregados na Equação 4, em conjunto com a velocidade (C_p) e a massa específica (ρ), para a obtenção do valor de v que corresponde àquele que melhor ajusta a Equação 4 com o valor de $|E^*|$ proveniente dos ensaios clássicos. Para cada temperatura de teste, os resultados estão indicados na Tabela 5.

Tabela 4 – Parâmetros reológicos

Parâmetro	Valores		
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 v (Equação 4)	0,366	0,349	0,341

Fonte: Autora (2020)

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 4 que fornece o $|E^*|$ a partir dos ensaios ultrassônicos.

2.5.6 Análises de sensibilidade dos parâmetros reológicos

Nesta seção foi realizada a análise de influência dos valores de ϕ e de v nos valores calculados de $|E^*|$ da mistura asfáltica. Essa análise foi realizada por meio do isolamento das referidas variáveis da Equação 4.

2.5.6.1 Influência da variação do coeficiente de Poisson nos valores de $|E^*|$

Essa análise partiu dos valores de v definidos na Tabela 5 e os 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. A Tabela 6 expõe os erros nos valores de $|E^*|$ calculados devido à variação de v , tomando-se como referência o valor de módulo que considerou valor de v fornecido na Tabela 5 para cada temperatura.

Tabela 5 – Influência da variação do Coeficiente de Poisson no $|E^*|$ em testes ultrassônicos

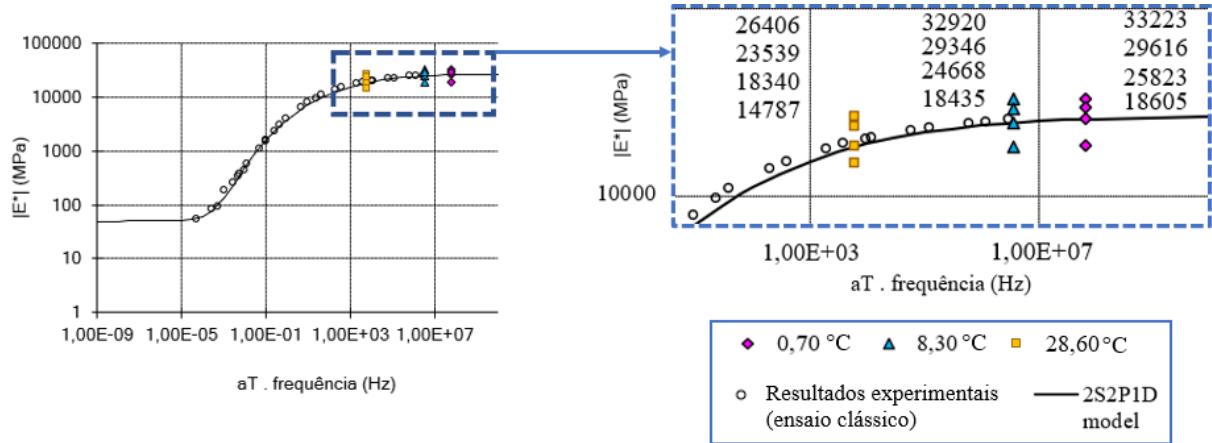
	Coef. de Poisson	0,250	0,300	0,366	0,400
Temperatura 28,6°C	$ E^* $	26406	23539	18340	14787
	Erro (%)	-43,98	-28,35	0,00	19,37
Temperatura 8,3°C	Coef. de Poisson	0,250	0,300	0,349	0,400
	$ E^* $	32920	29346	24668	18435
	Erro (%)	-33,45	-18,96	0,00	25,27
Temperatura 0,7°C	Coef. de Poisson	0,250	0,300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

Fonte: Autora (2020)

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 v . Ressalta-se também, a partir da Tabela 6, que a consideração de v no valor usual de 0,3 para misturas asfálticas brasileiras 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 11 exibe a curva mestra com os valores de $|E^*|$ com os diferentes valores de v da Tabela 6.

Figura 11 – Curva Mestra de Módulo Dinâmico, incluindo pontos determinados por ensaio ultrassônico variando coeficiente de Poisson



Fonte: Autora (2020)

A próxima análise consiste em adotar o valor intermediário do parâmetro v de 0,35 com base na Tabela 5, e, verificar os resultados de $|E^*|$ (Tabela 7). Esse valor corresponde aquele que gera 0% de erro em relação ao módulo obtido experimentalmente a 8,3°C. A Tabela 7 indica que a variação de v intermediário resulta em erros menores que 8% em relação aos valores de ϕ 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.

2.5.6.2 Influência da variação do Ângulo de fase nos valores de $|E^*|$

Di Benedetto *et al.* (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 4. Nesta análise também foi adotado $v=0,349$. 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 $7,6^\circ$, $2,0^\circ$ e $1,0^\circ$ para as temperaturas de $28,6^\circ\text{C}$, $8,3^\circ\text{C}$ e $0,7^\circ\text{C}$, 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.

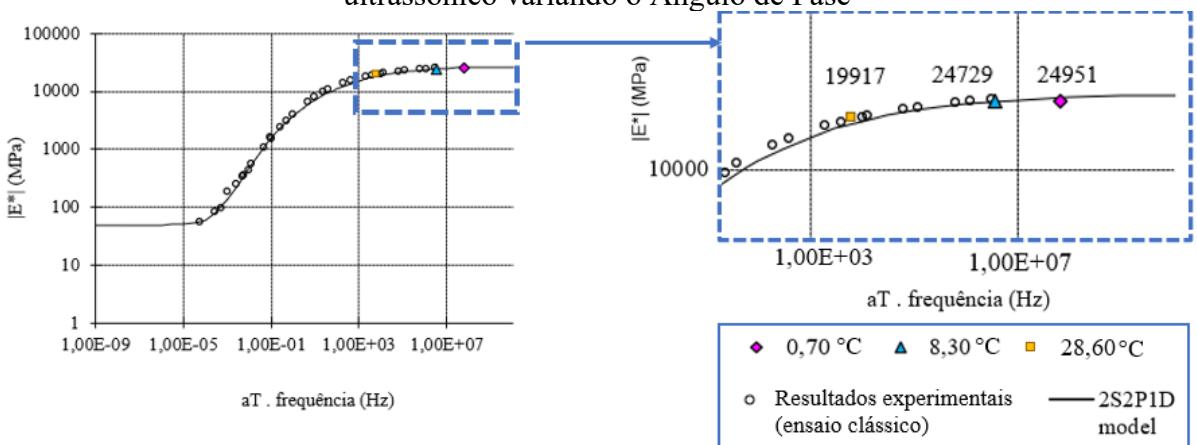
Tabela 6 – Módulo dinâmico com $\nu = 0,349$ – Teste ultrassônico

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

Fonte: Autora (2020)

A Figura 12 exibe a curva mestra com os valores de módulo dinâmico referentes à Tabela 7.

Figura 12 – Curva Mestra de Módulo Dinâmico, incluindo pontos determinados por ensaio ultrassônico variando o Ângulo de Fase



Fonte: Autora (2020)

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 12), que os erros da Tabela 7 podem ser considerados desprezíveis dependendo da aplicação, por exemplo

para controle tecnológico em campo. 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.

2.6 Conclusões

Foi apresentado o método de aplicação de ensaios ultrassônicos em misturas asfálticas para determinação do módulo dinâmico em 3 diferentes temperaturas (3 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 investigada. 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 estimativa 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.

3 ARTIGO 2: ENSAIOS ULTRASSÔNICOS COM ONDAS DE COMPRESSÃO E DE CISALHAMENTO APLICADOS NA CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

3.1 Resumo

Neste capítulo foram estudadas misturas asfálticas de diferentes composições por meio do ensaio de módulo complexo (DNIT, 2019) e ensaios de propagação de ondas ultrassônicas de compressão (ondas P) e cisalhamento (ondas S), tendo em vista as equações que relacionam a velocidade dessas ondas e os parâmetros reológicos da mistura asfáltica (módulo dinâmico e coeficiente de Poisson). As amostras foram controladas na UTM nas temperaturas -10°C, 4,4°C e 20°C. Foram também incluídos no programa experimental ensaios nas temperaturas de 40°C e 54°C, porém não foi possível a propagação de ondas em qualidade suficiente para a medição nos sensores, devido à excessiva atenuação no material, com exceção das misturas com adição de cinzas oriundas da queima de carvão em uma usina termoelétrica local. Isso se deve ao fato de nessas temperaturas o ângulo de fase já ter valor suficiente para que a mistura asfáltica amortenha excessivamente as ondas de cisalhamento propagadas, impedindo medidas de qualidade.

Em relação aos ensaios de propagação de onda de compressão, os resultados de tempos de voo e velocidades de onda P já possuem uma metodologia consagrada na estimativa do módulo dinâmico, desde que se adote por hipótese um valor de coeficiente de Poisson. Obtendo-se, além da velocidade da onda P, a velocidade da onda S, torna-se possível determinar o coeficiente de Poisson simultaneamente. É importante notar, porém, que a determinação da velocidade de propagação depende da adequada determinação do tempo de voo, que pode ser feita em diferentes posições no eixo do tempo do gráfico Amplitude vs. Tempo fornecido pelo equipamento.

Tipicamente, os equipamentos adotam o valor dos primeiros desvios de amplitude em torno de zero, o que produz valores de coeficientes de Poisson fisicamente inadmissíveis, devendo-se buscar outra maneira de aferir o tempo de voo da onda S, observando-se, por exemplo, o tempo até o primeiro máximo (primeira perturbação) ou o primeiro mínimo (segunda perturbação) no gráfico Amplitude vs. Tempo. Ambas as possibilidades foram avaliadas na pesquisa realizada. Os resultados para a hipótese da primeira perturbação foram validados pelos valores calculados de $|E^*|$ e com os valores de coeficiente de Poisson obtidos das medições, que produziram erros entre 5% e 22% para todas as amostras, independente da

composição. Dessa forma, é possível obter simultaneamente o coeficiente de Poisson e o módulo dinâmico das misturas asfálticas, sem a necessidade de hipóteses simplificadoras ou faixas de coeficiente de Poisson constantes, caracterizando assim a mistura asfáltica de forma mais aproximada com o comportamento viscoelástico linear.

3.2 Considerações iniciais

Na engenharia, há uma busca constante por métodos eficazes, fáceis e de rápida obtenção de resultados que possam agilizar o conhecimento de parâmetros de materiais, para objetivos distintos, desde o projeto e o dimensionamento de estruturas, até o controle de qualidade. No caso de misturas asfálticas, a busca por ensaios de controle tecnológico para caracterizar propriedades de desempenho, a exemplo dos ensaios ultrassônicos propostos nos últimos anos (DI BENEDETTO *et al.*, 2009; NORAMBUENA-CONTRERAS *et al.*, 2010; MOUNIER *et al.*, 2012; LARCHER *et al.*, 2015; RABELO *et al.*, 2020), em complemento a ensaios de aferição da composição, será cada vez mais importante à medida que métodos mais mecanicistas de projeto sejam implantados. A técnica se justifica pela simplicidade na execução do teste, para o qual a única medida obtida é o tempo de voo das ondas ao longo do comprimento da amostra.

Ressalta-se que a perturbação causada pela indução das ondas ultrassônicas em misturas asfálticas causa pequenas deformações que permitem caracterizar o comportamento viscoelástico linear, ainda que em apenas uma única frequência (MOUNIER *et al.*, 2012). Assim, estabelece-se a relação entre os parâmetros reológicos (pelo menos 3 ao todo, no caso de isotropia e linearidade) e a velocidade da onda, em uma equação denominada equação de onda. Os parâmetros reológicos requeridos (módulo, ângulo de fase e coeficiente de Poisson) são independentes, não podendo ser obtidos de forma simultânea por uma única equação (por exemplo a equação da velocidade de propagação da onda P, de compressão).

Sendo assim, é comum que 2 dos valores sejam admitidos por hipótese, ou então determinados por meio de outros testes, possivelmente de propagação de ondas com outros transdutores específicos, os quais são relacionados com os tipos de propagação das ondas. Trata-se de uma limitação dos métodos ultrassônicos. Observa-se, ainda, que, apesar de ser comumente adotado como uma constante, o coeficiente de Poisson em misturas asfálticas se caracteriza por ser um parâmetro viscoelástico, ou seja, dependente da temperatura e da frequência de carregamento (THEISEN, 2011; DI BENEDETTO *et al.*, 2007). Para os testes ultrassônicos, o coeficiente de Poisson se apresenta como parâmetro independente e o seu uso

como uma constante produz erros em torno de 30% para baixas temperaturas e 40 % para temperaturas elevadas, conforme Rabelo *et al.* (2020). Diante do exposto, justifica-se a investigação de testes que permitam a determinação do módulo sem a necessidade de assumir por hipótese valores fixos de coeficiente de Poisson. Umas das opções seria a combinação de resultados de tempos de voo de diferentes tipos de onda, por exemplo ondas P (de compressão) e ondas S (de cisalhamento), conforme investigado neste capítulo.

3.3 Revisão de literatura: propagação de ondas em sólidos

As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas, também chamadas na literatura de ondas de corpo. As características internas do material determinam sua forma de propagação e velocidade. Além disso, fatores externos como a temperatura podem influenciar na velocidade de propagação, como é o caso das misturas asfálticas, que apresentam comportamento termo-viscoelástico.

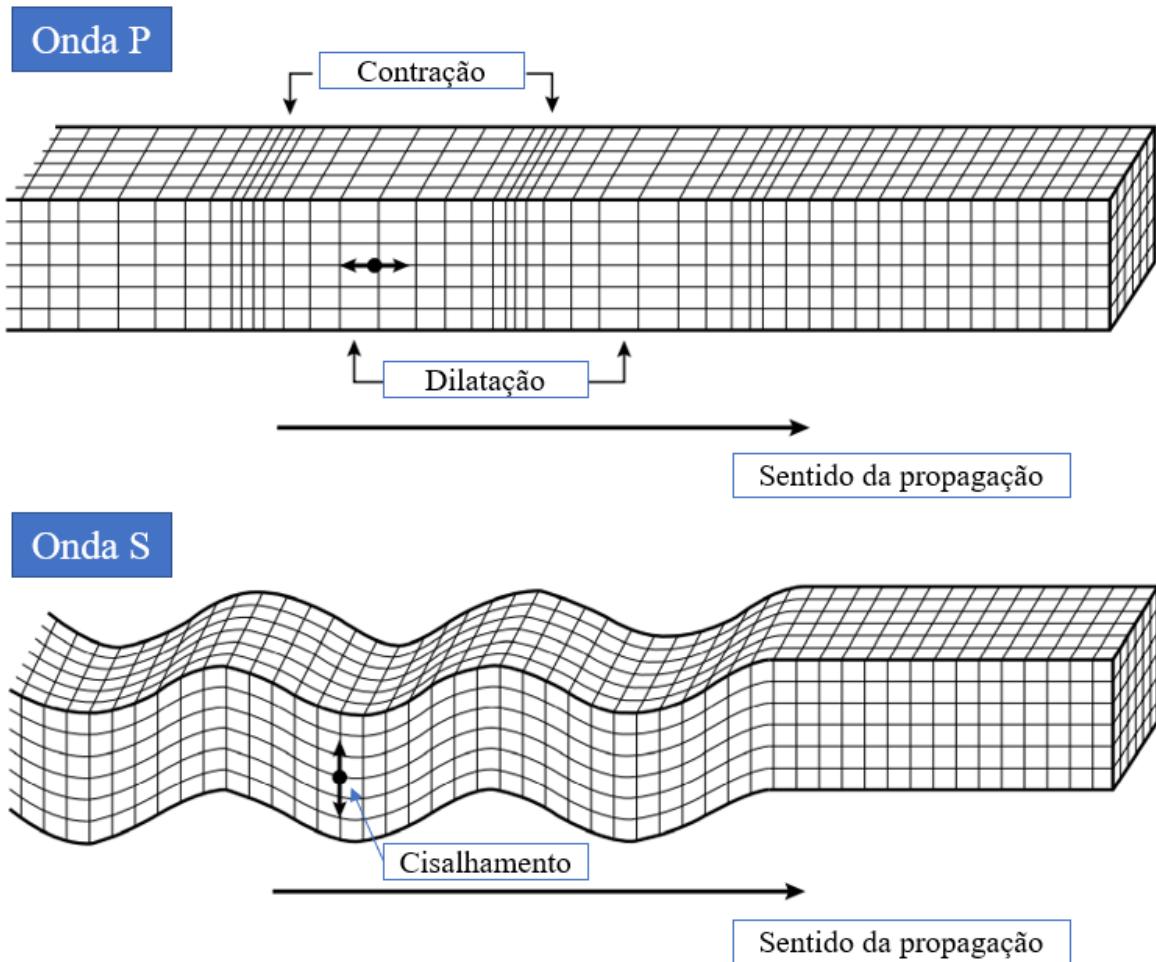
No âmbito da teoria da elasticidade, é possível mostrar que, se o material é isotrópico e homogêneo, as ondas de compressão e de cisalhamento são os únicos dois tipos de ondas de corpo que podem se propagar na massa, e que podem ocorrer simultaneamente em um mesmo material (PEDRAZA, 2018). Além disso, as velocidades de propagação dessas ondas se relacionam com propriedades fundamentais do material, de maneira que são meios para a determinação experimental de tais propriedades (CHEEKE, 2002).

Para a aplicação de testes ultrassônicos às misturas asfálticas, é importante entender os conceitos de ondas de compressão (Figura 13a) e de ondas de cisalhamento (Figura 13b) e com quais parâmetros reológicos elas se relacionam:

- a) as ondas de compressão (ondas P) também são denominadas de ondas primárias ou longitudinais. Seu modo de propagação causa deformações uniaxiais pois os movimentos de partículas se deslocam paralelos à direção de propagação (CHEEKE, 2002; KEAREY *et al.*, 2002). Em misturas asfálticas, essa velocidade está ligada ao valor do módulo dinâmico, principalmente, mas também ao coeficiente de Poisson e ao ângulo de fase.
- b) as ondas de cisalhamento (ondas S) também são denominadas de ondas transversais ou secundárias. As ondas S se propagam por uma tensão de cisalhamento pura em uma direção perpendicular à direção de propagação da onda, sem alteração de volume (CHEEKE, 2002; KEAREY *et al.*, 2002). Em misturas asfálticas, as ondas S, desde que estudadas em conjunto com as ondas

P, dão acesso ao valor do coeficiente de Poisson (MOUNIER *et al.*, 2012; PEDRAZA, 2018).

Figura 13 – Modos de oscilação (ondas P e S)



Fonte: Adaptado de KEAREY *et al.* (2002)

O pulso ultrassônico pode ser emitido por um mesmo equipamento de ultrassom (ilustrado adiante na Seção 3.4) para ambos os tipos de onda, diferindo-se pela configuração dos cristais piezelétricos do transdutor e do receptor e pela frequência emitida. Diante do exposto, este trabalho apresenta o estudo de técnicas de caracterização do módulo e do coeficiente de Poisson por meio de propagação de ondas S e ondas P em diferentes composições de misturas asfálticas para diferentes temperaturas, com subsequente validação dos resultados com aqueles oriundos do ensaio convencional de módulo complexo (DNIT, 2019).

3.4 Materiais e métodos

As amostras utilizadas são submetidas ao ensaio de módulo complexo (DNIT, 2019) e, posteriormente, aos testes ultrassônicos com as temperaturas estabilizadas na prensa UTM-25. Tratam-se de corpos-de-prova cilíndricos convencionais com aproximadamente 150 mm de altura e 100 mm de diâmetro.

3.4.1 Características das amostras

A Tabela 8 apresenta as características das 8 amostras estudadas e das misturas correspondentes, sendo 6 misturas oriundas do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC e 2 da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). As misturas investigadas estão identificadas da seguinte forma:

- CC39 e CC40: compostas de ligante CAP 50/70 da Petrobras/Lubnor em Fortaleza, agregado granítico e com adição de 5% de cinza volante;
- MOAM7 e MOAM9: misturas provenientes da UFAM, com CAP 50/70 da Refinaria Isaac Sabbá – REMAN em Manaus e agregado granítico (regional). Essas amostras correspondem às misturas M0 e M1, da tese em andamento da doutoranda Daniela Guimarães;
- R13 e R15: compostas de CAP 50/70 da Petrobras/Lubnor e agregado granítico do Ceará;
- SC4 e SC40: obtidas pela combinação de CAP 50/70 da Petrobras/Lubnor com agregado granítico.

Tabela 8 – Características das amostras

Amostra	Diâmetro (mm)	Comprimento L (mm)	Massa Específica (g/cm ³)	Teor de ligante (%)	Volume de vazios (%)
CC39	100,250	144,50	2,41	5,3	4,2
CC40	100,205	145,73	2,41	5,3	4,2
MOAM7	100,285	149,10	2,37	4,7	4,0
MOAM9	100,048	149,13	2,37	4,7	4,0
R13	100,060	153,80	2,35	4,6	5,1
R15	100,235	151,27	2,35	4,6	5,1
SC4	100,123	152,46	2,42	4,8	5,0
SC40	100,050	151,80	2,42	4,8	5,0

Fonte: Autora (2022)

Ressalta-se que processo de dosagem seguiu o método Superpave (AASHTO, 2017), visando à obtenção de misturas asfálticas com Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 12,5mm e que apresentassem 4,0% de vazios.

3.4.2 Determinação do Módulo Dinâmico por ensaios quase-estáticos

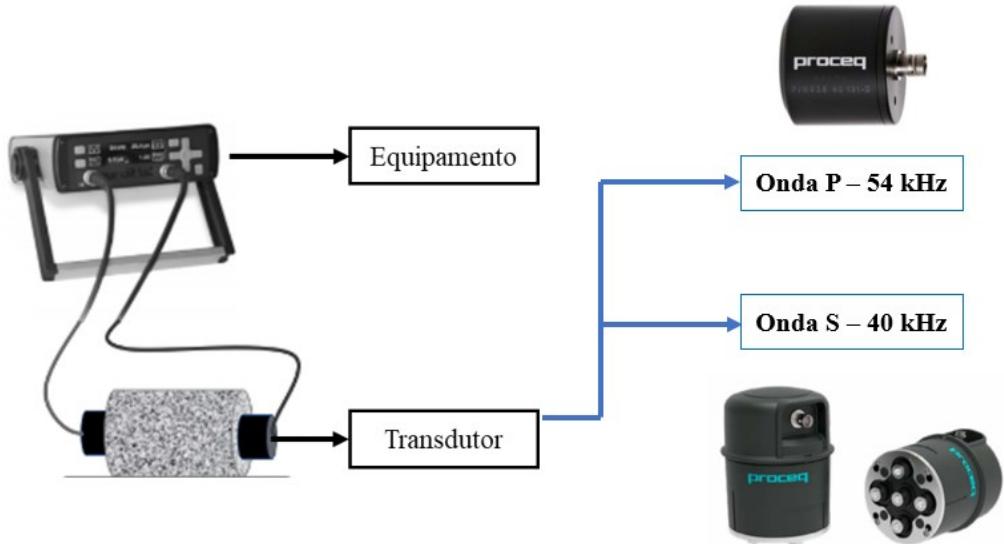
Para a determinação do valor absoluto do módulo complexo e do ângulo de fase das misturas asfálticas, são seguidas as recomendações do DNIT 416 (2019), com 6 frequências de carregamento (0,1Hz; 0,5Hz; 1Hz; 5Hz; 10Hz; 25Hz) e 5 temperaturas (-10°C; 4°C; 20°C; 40°C; 54°C). Os ensaios foram realizados numa prensa servo-hidráulica do tipo *Universal Testing Machine* (UTM-25).

3.4.3 Determinação do módulo dinâmico por ensaios de propagação de pulsos ultrassônicos

O pulso ultrassônico foi induzido com auxílio de equipamento Pundit Lab (Figura 14) previamente calibrado, conforme indicação do fabricante. Os dois transdutores (emissor e receptor) são posicionados, sendo um em cada extremidade da amostra cilíndrica de mistura asfáltica. Essa disposição dos transdutores caracteriza a medida como direta, pois assegura o potencial de transmissão máximo do sinal já calibrado e, assim, obtém-se o tempo de pulso sem atraso. Cada transdutor é capaz de emitir um pulso ultrassônico numa única frequência, próximo de sua frequência nominal e que depende do tipo de onda emitida.

Neste trabalho foram utilizados para a emissão de ondas de compressão os transdutores de superfície plana de 50mm de diâmetro e frequência nominal de 54kHz (54 kHz *Transducer*). Para a emissão de ondas de cisalhamento, foram usados transdutores de 84mm de diâmetro e frequência nominal de 40kHz (40 kHz *Dry-Point Shear Wave Transducer*), conforme Figura 14.

Figura 14 – Equipamento Pundit Lab



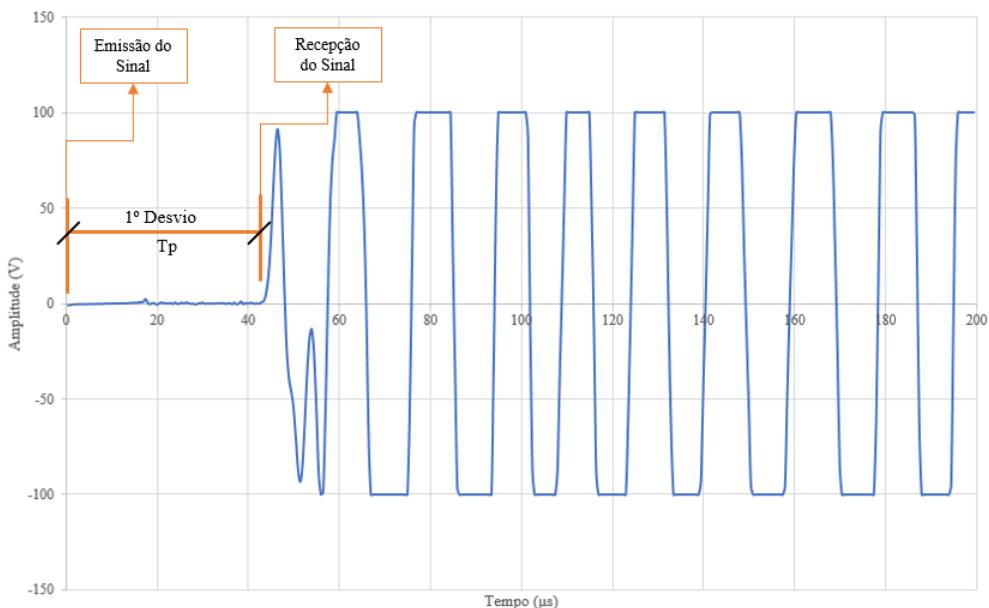
Fonte: Autora (2022), adaptado de Pundit (2017), adaptado de Pundit (2018)

3.4.3.1 *Medição do tempo de voo*

As emissões das ondas de compressão e cisalhamento foram processadas de maneiras distintas, devido aos seus diferentes transdutores e características das ondas produzidas, e conforme indicação na literatura. Para ambos os tipos de onda, foram aplicados no mínimo 5 pulsos para aferição do tempo de voo para cada temperatura.

Segundo Pedraza (2018) e Stephenson e Manke (1972), o tempo de voo das ondas P é o intervalo de tempo entre o primeiro desvio do sinal transmitido e o primeiro desvio do sinal recebido, o que na maioria das vezes coincide com a indicação automática do equipamento (Figura 15), desde que adequadamente configurado.

Figura 15 – Gráfico Amplitude vs. Tempo de onda P medida no receptor do ultrassom



Fonte: Autora (2022)

Para o cálculo da velocidade da onda de compressão (C_p) na Equação 7, divide-se o comprimento da amostra (L) pelo tempo de voo (T_p).

$$C_p = L/T_p \quad (7)$$

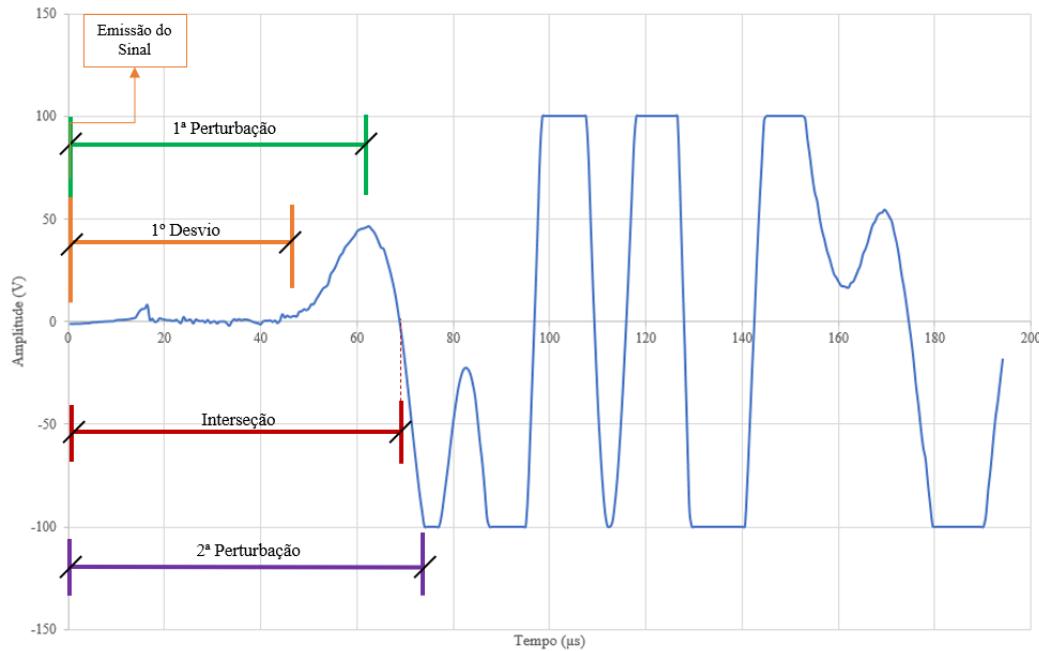
Para a definição do tempo de voo da onda de cisalhamento (T_s), foram estudadas as amplitudes mínimas e máximas do gráfico Amplitude vs. Tempo fornecidas pelo equipamento, além da indicação automática do equipamento (que, como para as ondas P, corresponde ao primeiro desvio, conforme Figura 15). Segundo Mounier *et al.* (2012) e Pedraza (2018), o primeiro desvio não é o critério mais adequado neste caso, e sim, a consideração do tempo de voo no primeiro vale observado. É o momento de determinação do tempo de voo que permite obter bons resultados, ou seja, resultados condizentes com os valores medidos por ensaios quase-estáticos de coeficiente de Poisson. Por outro lado, Stephenson e Manke (1972) apontam que o ponto de interseção do gráfico com a origem entre a primeira e segunda perturbação fornecem resultados mais exatos de coeficiente de Poisson.

Partindo do confronto de resultados entre esses autores, foram então estudados os valores de 4 diferentes momentos para a determinação do tempo de voo de ondas S (Figura 16), e consequentemente da velocidade das ondas S, sendo os tempos de voo obtidos os correspondentes a:

- primeiro desvio;

- b) primeira perturbação (pico ou vale);
- c) interseção do gráfico com a origem, entre a primeira e a segunda perturbações;
- d) segunda perturbação (pico ou vale).

Figura 16 – Gráfico Amplitude vs. Tempo de onda S medida no receptor do ultrassom



Fonte: Autora (2022)

A Equação 8 estabelece o cálculo da velocidade da onda de Cisalhamento (C_s), independentemente do critério utilizado para aferição do tempo de voo da onda S (T_s).

$$C_s = L/T_s \quad (8)$$

3.4.3.2 Compatibilização das frequências

Numa consideração prévia, foi realizada a análise de Fourier (TRF) dos sinais gravados do receptor, para todas as leituras. A TRF fornece o conteúdo de frequência durante toda a emissão do sinal, particularmente a frequência característica, que corresponde à frequência de pico (a mais presente no conteúdo de frequência) obtida para cada tipo de onda.

Em seguida, para a aplicação dos resultados das velocidades de ondas na obtenção dos parâmetros reológicos, deve-se realizar a compatibilização entre as frequências das ondas P e das ondas S, devido ao fato de as frequências dos transdutores usados para os diferentes

tipos de onda serem diferentes (PEDRAZA, 2018). Dessa forma, neste trabalho os resultados de velocidades de ondas P foram convertidos conforme Equação 9, para posterior aplicação com as velocidades de ondas S para a obtenção do coeficiente de Poisson, na mesma frequência. Os resultados utilizados serão correspondentes às frequências resultantes da análise de Fourier para cada tipo de onda.

$$Cp(fs) = Cp(fp) \sqrt{\frac{|E^*|2S2P1D(fp)}{|E^*|2S2P1D(fs)}} \quad (9)$$

Ressalta-se que essas relações fundamentais entre a velocidade da propagação da onda e as propriedades físicas dos materiais pelos quais as ondas passam, são independentes da frequência das ondas (KEAREY *et al.*, 2002), desde que determinadas para uma mesma frequência no caso de materiais viscoelásticos (que mudam de propriedade em função da frequência).

3.4.3.3 Obtenção do coeficiente de Poisson (ν)

Após a compatibilização das frequências, o coeficiente de Poisson medido (ν_{med}) pode ser relacionado às velocidades de onda P (Cp) e onda S (Cs), pela Equação 10 (KEAREY *et al.*, 2002):

$$\nu_{med} = \frac{(1/2)(Cp/Cs)^2 - 1}{(Cp/Cs)^2 - 1} \quad (10)$$

Em seguida, os resultados de coeficiente de Poisson das medições (ν_{med}) são comparados aos resultados de coeficiente de Poisson (ν_{calc}). O ν_{calc} é obtido por meio de otimização utilizando a ferramenta *Solver*, do Excel, cujo resultado é buscado visando que a Equação 11 retorne o valor de ν_{calc} compatível com as demais entradas de dados, a saber:

- $|E^*|_{fs}$: módulo dinâmico na frequência característica da onda S, obtido no modelo 2S2P1D para a frequência principal emitida (frequência característica) e na temperatura do ensaio, e ângulo de fase \emptyset correspondente;

- b) Cp_{fs} : velocidade da onda P compatibilizada na frequência característica da onda S, obtida pela Equação 9;
- c) ρ : massa específica (g/cm^3), obtida na Tabela 8.

$$|E^*|_{fs} = Cp_{fs}^2 \cos^2 \left(\frac{\emptyset}{2} \right) \rho \frac{(2v_{calc} - 1)(v_{calc} + 1)}{(v_{calc} - 1)} \quad (11)$$

Posteriormente, os valores de coeficiente de Poisson são validados por meio da obtenção de novos valores de $|E^*|$, correspondentes ao resultado de módulo obtido com ensaio de ondas, conforme Equação 12.

$$|E^*|_{ondas} = Cp_{fs}^2 \cos^2 \left(\frac{\emptyset}{2} \right) \rho \frac{(2v_{med} - 1)(v_{med} + 1)}{(v_{med} - 1)} \quad (12)$$

3.5 Resultados e discussões

Os resultados dos ensaios ultrassônicos para as ondas de compressão e de cisalhamento são fornecidos em 3 temperaturas: -10°C , $4,4^\circ\text{C}$ e 20°C . As amostras foram testadas nas 5 temperaturas requeridas do ensaio clássico (DNIT, 2019). Entretanto, durante a emissão da onda de compressão, para as leituras na temperatura de 54°C , houve a perda da transmissão do sinal de propagação da onda entre os transdutores na amostra, devido ao comportamento de atenuação (maior ângulo de fase) de misturas asfálticas nessas temperaturas.

Por outro lado, para as amostras CC39 e CC40, as quais apresentam em sua composição 5% de cinzas volantes, obtiveram-se medidas de tempo de voo de ondas P sem a perda do sinal. Esse comportamento pode ser explicado devido às misturas com adição de cinzas volantes apresentarem maior rigidez e, portanto, resistirem melhor a carregamentos lentos em temperaturas elevadas (OLIVEIRA, 2019). Enquanto isso, durante a emissão das ondas de cisalhamento, não foi possível qualquer resultado para as temperaturas de 40°C e $54,4^\circ\text{C}$, devido a perda da transmissão do sinal de propagação entre os transdutores, também por conta da atenuação.

3.5.1 Medida direta do tempo de voo e da velocidade da onda de compressão (onda P)

Pedraza (2018) explica que o tempo de voo da onda P corresponde ao intervalo de tempo de transmissão e recepção do sinal. Esse intervalo equivale à soma do tempo de voo das ondas na amostra e o tempo de reação da cadeia de medição. O tempo de reação (compensação automática do equipamento) indicado foi de 6.1 μ s, sendo este valor subtraído do tempo de voo considerado nos cálculos subsequentes.

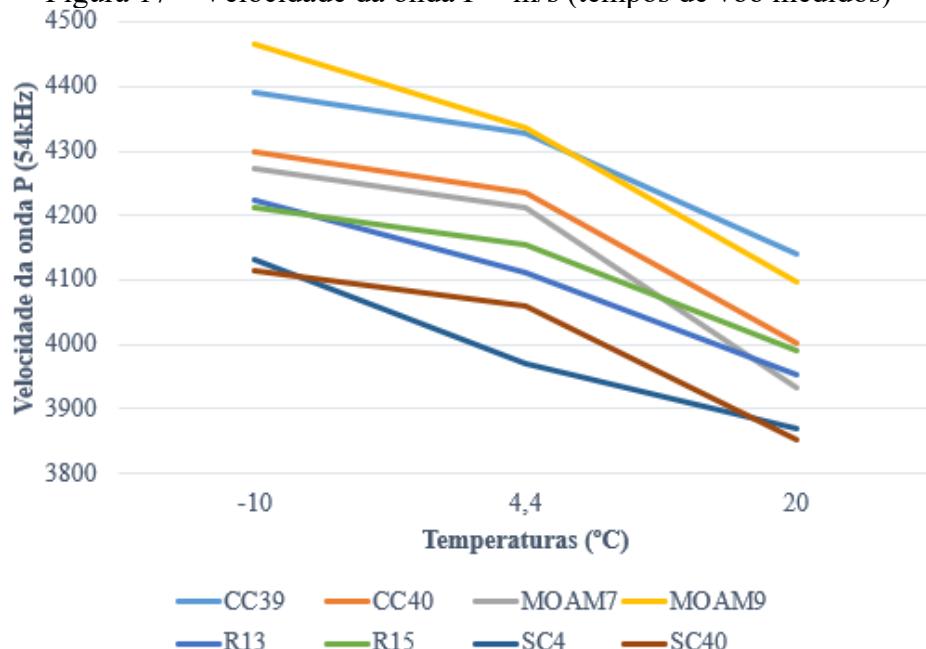
No cálculo da velocidade das ondas de compressão, considerou-se o valor de tempo de voo que se repetiu por pelo menos 3 leituras (Tabela 9), partindo das considerações supracitadas. A maioria das leituras coincidiu com a resposta automática do equipamento, programado para emitir sinais com amplitude de 500V e detectar variações a partir de 0,5 %. Os resultados da velocidade de onda P obtidos com os tempos da medição estão ilustradas na Figura 17.

Tabela 9 – Tempos de voo da onda P medidos (μ s)

Temperatura	CC39	CC40	MOAM7	MOAM9	R13	R15	SC4	SC40
-10°C	32,9	33,9	34,9	33,4	36,4	35,9	36,9	36,9
4,4°C	33,4	34,4	35,4	34,4	37,4	36,4	38,4	37,4
20°C	34,9	36,4	37,9	36,4	38,9	37,9	39,4	39,4

Fonte: Autora (2022)

Figura 17 – Velocidade da onda P – m/s (tempos de voo medidos)



Fonte: Autora (2022)

À medida em que a temperatura aumenta, a velocidade da onda P (C_p) diminui para cada amostra testada. Para a frequência de medição, as velocidades C_p variam entre 4465 e 4114 m/s a uma temperatura de -10°C . A uma temperatura de $4,4^{\circ}\text{C}$, os valores máximos de C_p diminuem, situando-se entre 4335 e 3970 m/s. Para os testes a 20°C , as velocidades caem ainda mais, ficando seus valores entre 4140 e 3853 m/s.

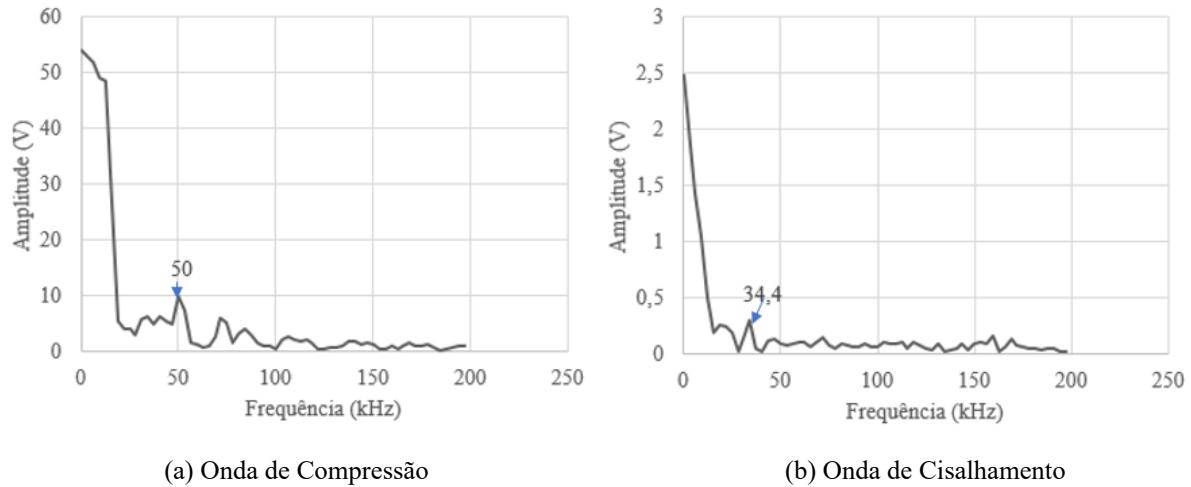
Ressalta-se que as misturas R e SC ($\text{vv}=5\%$) apresentam tempos de voo superiores aos tempos de voo das misturas CC e MO ($\text{vv}=4\%$).

3.5.2 Frequências características

A fim de dar prosseguimento aos cálculos do coeficiente de Poisson, é necessário que as velocidades de onda P sejam compatibilizadas com a frequência da onda S. Porém, não se pode trabalhar diretamente com a frequência emitida do transdutor, mas com as frequências características que foram obtidas a partir da análise dos resultados da análise de Fourier já mencionada (TRF), para ambos os tipos de ondas, como discorrido anteriormente. A frequência característica equivale à frequência de pico obtida, as quais corresponderam aos valores aproximados da frequência nominal do transdutor utilizado.

Foi considerada a frequência de 50kHz, correspondente ao valor aproximado da frequência emitida pelo transdutor da onda de compressão e 34,4kHz referente à frequência emitida pelo transdutor da onda de cisalhamento (Figura 18). Observa-se a presença de outros picos inferiores incompatíveis com a frequência do sinal que foi emitido, o que indica a excitação de outro tipo de vibração diferente da onda enviada, sendo os outros picos descartados da análise.

Figura 18 – Análise de Fourier



Fonte: Autora (2022)

3.5.3 Compatibilização de frequências

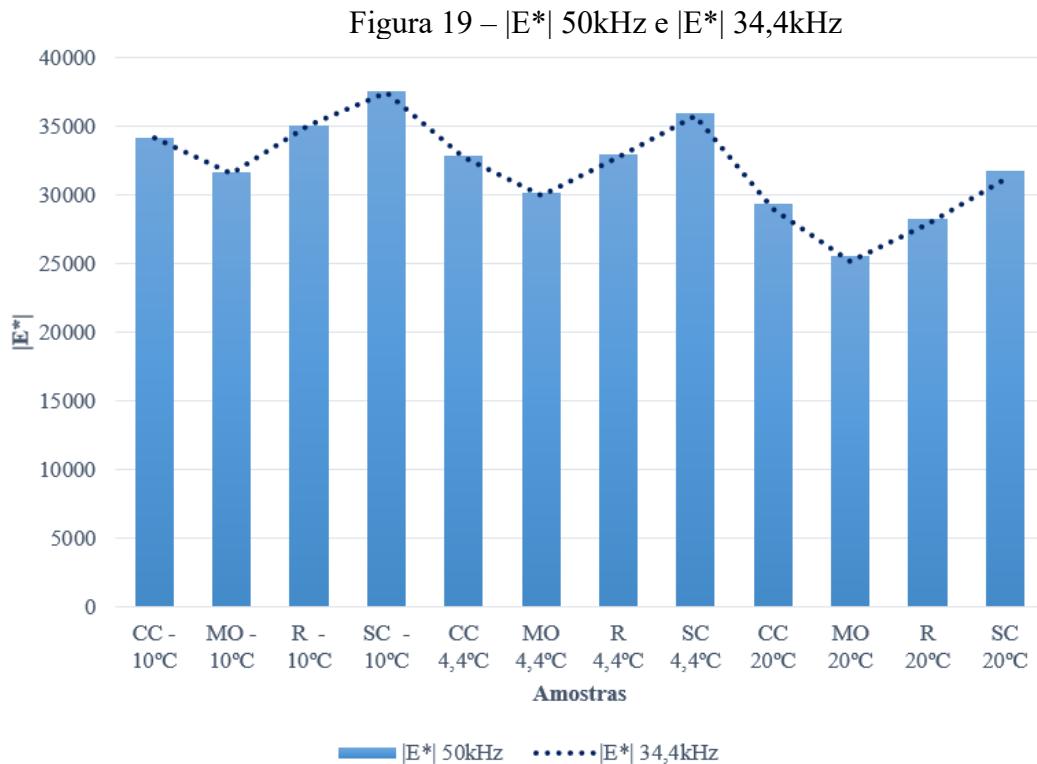
Em seguida, o valor da velocidade C_p 50kHz (referente à frequência de transmissão – Figura 19) foi aplicado na Equação 13 em conjunto com os valores de $|E^*|$ à 50kHz (frequência característica da onda P) e $|E^*|$ à 34,4kHz (frequência característica da onda S), obtidos por ensaios quase-estáticos e modelagem 2S2P1D. Os resultados das velocidades de onda P compatibilizadas estão apresentados na Tabela 10. A Figura 19 apresenta a variação de $|E^*|$ 50kHz e $|E^*|$ 34,4kHz.

$$C_p(34,4\text{kHz}) = C_p(50\text{kHz}) \sqrt{\frac{|E^*|2S2P1D(50\text{kHz})}{|E^*|2S2P1D(34,4\text{kHz})}} \quad (13)$$

Tabela 10 – C_p 34,4 kHz (m/s)

Temperatura	CC39	CC40	MOAM7	MOAM9	R13	R15	SC4	SC40
-10°C	4394	4300	4274	4467	4228	4217	4134	4117
4,4°C	4334	4244	4221	4345	4123	4166	3983	4071
20°C	4165	4027	3964	4128	3979	4017	3908	3891

Fonte: Autora (2022)



Fonte: Autora (2022)

A diferença de resultados entre as duas frequências foi pequena em relação ao $|E^*|$ 34,4kHz, devido às frequências de teste indicarem valores aproximados (uma é apenas 1,45 vezes a outra), tendo em vista também a ordem de grandeza dos valores de $|E^*|$ e a proximidade nessas altas frequências e baixas a moderadas temperaturas do comportamento assintótico da curva mestra de módulo (próximo do módulo vítreo).

Em relação às misturas CC, observam-se valores mais elevados de valor absoluto de módulo complexo para a temperatura de 20°C. Ressalta-se que as misturas CC são as únicas a 54°C em que foi possível propagar o pulso ultrassônico sem a perda de sinal dentro da amostra, como já discorrido anteriormente.

3.5.4 Medida direta do tempo de voo e da velocidade da onda de cisalhamento (onda S)

Os transdutores utilizados neste estudo para a propagação de ondas de cisalhamento têm um comportamento bastante diferente dos sensores de ondas de compressão. Ao contrário da recepção da onda P, o primeiro movimento de partícula a chegar ao receptor não estará no mesmo modo que a entrada principal (STEPHENSON E MANKE, 1972). Os autores também explicam que, embora o modo de entrada principal seja o cisalhamento, o efeito de Poisson também fará com que as ondas de compressão de pequena amplitude sejam introduzidas na

amostra. Essas ondas (ondas P), viajam com maior velocidade, chegando ao receptor antes da onda S, por isso o equipamento responde automaticamente, mas isso não corresponde inicialmente à onda de cisalhamento. Porém, a onda S apresenta maior amplitude. Se a amplitude da onda de cisalhamento original não é grande o suficiente, sua chegada ao receptor será mascarada por outras indicações de perturbação, que não correspondem à onda S.

Essa consideração esclarece o motivo pelo qual são obtidos valores incoerentes de coeficientes de Poisson se obtidos por meio da Equação 10 a partir das primeiras perturbações medidas no receptor, que é o que é comumente programado nos equipamentos por padrão. Em outras palavras, nessa primeira hipótese em que o tempo de voo da onda S é a primeira perturbação (resposta automática do equipamento), valores incompatíveis com medidas de ensaios quase-estáticos ou mesmo fisicamente inadmissíveis de coeficiente de Poisson são obtidos, portanto não podem corresponder ao comportamento do material. Os valores assim obtidos estão indicados na Tabela 11 apenas para ilustração do referido problema e não serão utilizados nos cálculos subsequentes.

Tabela 11 – Coeficientes de Poisson calculados (Equação 11)

AMOSTRA / T (°C)	-10	4,4	20
CC39	-0,355	-0,114	0,066
CC40	-0,515	0,006	-0,235
MOAM7	-0,220	-0,045	-0,182
MOAM9	-0,036	0,051	0,078
R13	-0,149	-0,056	-0,073
R15	-0,505	-0,018	-0,161
SC4	-0,410	-0,139	-0,050
SC40	-0,358	-0,057	-0,096

Fonte: Autora (2022)

Partindo para as próximas hipóteses, obtiveram-se os tempos de voo de onda S na primeira perturbação, na interseção entre as perturbações e na segunda perturbação do gráfico Amplitude vs. Tempo de cada leitura. As referidas perturbações se configuraram ou como picos ou como vales no gráfico, e, a interseção coincide com o cruzamento do gráfico com o eixo do tempo entre a primeira e a segunda perturbações, conforme Figura 16. Da mesma forma que para as ondas de compressão, foi subtraído 6.1 μ s (compensação automática do equipamento) para os valores de tempo de voo das ondas de cisalhamento.

Segundo Stephenson e Manke (1972), o problema básico na medição da velocidade da onda S é a alta atenuação, além da dificuldade de garantir uma boa acoplagem dos transdutores na amostra. Para este segundo problema, pressionar adequadamente os

transdutores ajuda na execução do ensaio. Além disso, salienta-se que na configuração do ensaio de propagação de onda S, os autores Stephenson e Manke (1972), Mounier *et al.* (2012) e Pedraza (2018) utilizaram um amplificador de sinal externo para mitigação do efeito de atenuação. O equipamento usado neste trabalho apresenta uma configuração que não necessita de um amplificador externo (PUNDIT, 2018).

A Tabela 12 traz os resultados dos tempos de voo e suas respectivas velocidades da onda S, para as hipóteses da consideração do tempo de voo na 1^a e na 2^a perturbações e também na interseção, com seus respectivos coeficientes de Poisson medidos (v_{med}), obtidos por meio da Equação 10. A Tabela 12 também contém os valores calculados de coeficiente de Poisson (v_{calc}) obtidos na Equação 11, considerando como referência os valores de módulo E*| 34,4kHz, ângulo de fase correspondente (ensaio quase-estático) e a velocidade da onda P compatibilizada para a frequência característica observada no ensaio com a onda S (Cp 34,4 kHz).

Tabela 12 – Tempo de voo (μs) e velocidade da onda S (m/s)

		MISTURA CC39				MISTURA CC40			
Leitura		Ts	Cs 40khz	v med	v calc	Ts	Cs 40khz	v med	v calc
-10°C	1a Perturbação	57,5	2513	0,257		58,0	2513	0,241	
	Interseção	64,0	2258	0,321	0,304	65,0	2242	0,314	0,289
	2a Perturbação	68,0	2125	0,347		68,0	2143	0,335	
4,4° C	1a Perturbação	57,5	2513	0,247		60,0	2429	0,256	
	Interseção	64,5	2240	0,318	0,309	67,0	2175	0,322	0,294
	2a Perturbação	70,5	2050	0,356		73,5	1983	0,360	
20°C	1a Perturbação	63,0	2294	0,282		61,0	2389	0,228	
	Interseção	73,0	1979	0,354	0,322	68,5	2127	0,306	0,301
	2a Perturbação	84,5	1710	0,399		74,0	1969	0,343	

		MISTURA MOAM7				MISTURA MOAM9			
Leitura		Ts	Cs 40khz	v med	v calc	Ts	Cs 40khz	v med	v calc
-10°C	1a Perturbação	58,0	2571	0,217		59,5	2506	0,270	
	Interseção	66,5	2242	0,310	0,306	66,0	2260	0,328	0,333
	2a Perturbação	73,5	2029	0,355		72,0	2071	0,363	
4,4° C	1a Perturbação	59,5	2506	0,228		62,0	2405	0,279	
	Interseção	69,0	2161	0,322	0,315	68,0	2193	0,329	0,332
	2a Perturbação	77,5	1924	0,369		73,5	2029	0,361	
20°C	1a Perturbação	64,0	2330	0,230		65,0	2294	0,277	
	Interseção	73,0	2042	0,302	0,329	75,0	1988	0,349	0,350
	2a Perturbação	84,5	1764	0,374		86,0	1734	0,393	

Tabela 12 – Tempo de voo (μs) e velocidade da onda S (m/s)
(Continuação)

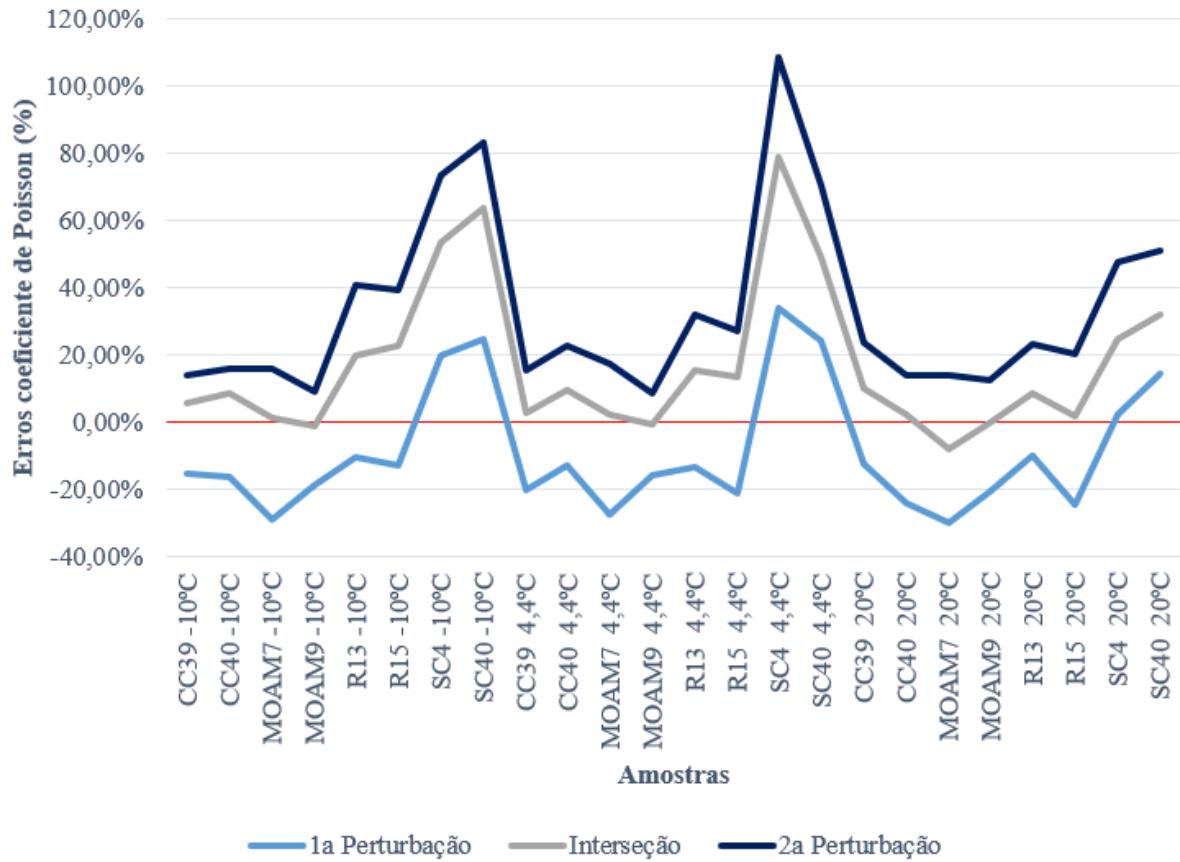
		MISTURA R13				MISTURA R15			
Leitura		Ts	Cs 40khz	v med	v calc	Ts	Cs 40khz	v med	v calc
-10°C	1a Perturbação	61,0	2521	0,224		59,5	2542	0,214	
	Interseção	68,0	2262	0,299	0,250	67,5	2241	0,303	0,247
	2a Perturbação	76,0	2024	0,351		73,5	2058	0,344	
4,4° C	1a Perturbação	62,5	2461	0,223		60,0	2521	0,211	
	Interseção	69,5	2213	0,298	0,258	68,5	2208	0,305	0,268
	2a Perturbação	76,0	2024	0,341		74,0	2044	0,341	
20°C	1a Perturbação	68,5	2245	0,266		63,5	2382	0,229	
	Interseção	75,5	2037	0,322	0,297	71,5	2116	0,308	0,304
	2a Perturbação	84,0	1831	0,366		81,5	1856	0,364	

		MISTURAS SC4				MISTURAS SC40			
Leitura		Ts	Cs 40khz	v med	v calc	Ts	Cs 40khz	v med	v calc
-10°C	1a Perturbação	62,5	2439	0,233		62,5	2429	0,233	
	Interseção	69,0	2210	0,300	0,195	70,0	2169	0,308	0,188
	2a Perturbação	74,5	2046	0,338		75,5	2011	0,343	
4,4° C	1a Perturbação	64,0	2382	0,220		65,0	2335	0,254	
	Interseção	72,0	2118	0,303	0,165	71,0	2138	0,310	0,208
	2a Perturbação	78,5	1942	0,344		77,5	1959	0,349	
20°C	1a Perturbação	67,0	2276	0,241		69,0	2200	0,263	
	Interseção	73,5	2074	0,304	0,235	75,0	2024	0,315	0,240
	2a Perturbação	81,0	1882	0,348		81,0	1874	0,348	

Fonte: Autora (2022)

De um modo geral, os valores de coeficiente de Poisson (v_{med}) aumentam à medida que a temperatura de teste aumenta. Além disso, os resultados de coeficiente de Poisson são compatíveis com os valores adotados da literatura para testes ultrassônicos no intervalo de 0,25 a 0,35 (DI BENEDETTO *et al.*, 2009; NORAMBUENA-CONTRERAS *et al.*, 2010; MOUNIER *et al.*, 2012; LARCHER *et al.*, 2015). A Figura 20 ilustra os erros produzidos referentes aos valores de v_{med} e v_{calc} calculados conforme a Equação 14:

$$Ev (\%) = \frac{v_{med} - v_{calc}}{v_{calc}} \times 100 \quad (14)$$

Figura 20 – Erros resultantes entre v_{med} e v_{calc} 

Fonte: Autora (2022)

Diante dos resultados dos erros entre os valores de coeficiente de Poisson, provenientes das medições de ambos os testes ultrassônicos (v_{med}) e os valores de coeficiente de Poisson obtidos pela equação da onda P (v_{calc}), conclui-se que:

- para as misturas CC, os erros resultam entre 12% a 20%, para a primeira perturbação e, 14% a 24% para a segunda perturbação, para todas as temperaturas. Para a hipótese da interseção, os erros variam de 2% a 10%, aproximadamente;
- para as misturas MO, os erros produzidos para a primeira perturbação são de 16% a 30% e, para a segunda perturbação, 9% a 16%, em todas as temperaturas. Os erros para a hipótese da interseção são de 0,17% a 8%;
- para as misturas R, para a primeira perturbação os erros são de 10% a 25% e de 20% a 41% para a segunda perturbação. Os erros são de 1% a 23% para a hipótese da interseção. Observa-se para esta última hipótese, que para essa mistura os erros são menores para a temperatura de 20°C;

- d) para as misturas SC, os erros são de 2% a 34% para a primeira perturbação e 48% a 109%, para a segunda perturbação. Para a hipótese da interseção, observa-se erros superiores se comparado às demais misturas, em torno de 24% a 79%. Os erros de (ν) resultantes dessas misturas são favoráveis à consideração do tempo de voo da onda S na primeira perturbação.

Observa-se que esses erros parecem depender da própria natureza de variabilidade das propriedades das misturas, entre essas destaca-se o volume de vazios. Para todas as hipóteses, constata-se que para as amostras CC e MO, misturas com volumes de vazios em torno de 4% produziram erros inferiores às misturas R e SC, com volumes de vazios de aproximadamente 5%.

Para Castillo e Caro (2014), essa variabilidade surge da consideração do valor de volume de vazios médio para a caracterização da mistura, como também influenciam as suas propriedades mecânicas. Os autores ressaltam que a distribuição média dos vazios se altera conforme a profundidade da amostra, dessa forma as extremidades apresentam maiores valores de Vv e esses valores diminuem seguindo para o interior da amostra.

Observa-se também que a temperatura não é um fator determinante nos erros, que seguem magnitudes similares independente da temperatura de ensaio. Ressalta-se que qualquer alteração na leitura do gráfico altera significativamente o valor do coeficiente de Poisson (ν_{med}). Isso foi observado também por Jurado (2008).

Em comparação aos autores que também obtiveram resultados experimentais de ν por propagação de ondas S, os erros entre os resultados experimentais e calculados foram entre 13% e 38% para Mounier *et al.* (2012), no estudo de misturas convencionais e, para Pedraza (2018), em torno de 80%, no estudo de misturas recicladas. Ambos os autores, mediram o tempo de voo da onda S no primeiro mínimo.

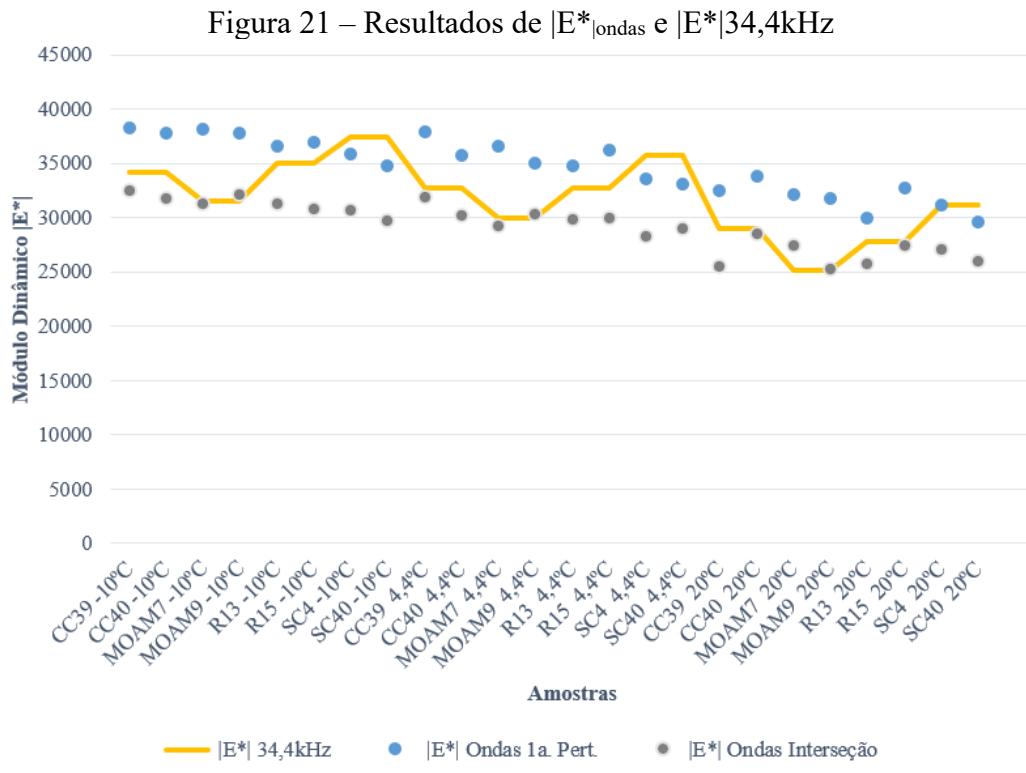
3.5.5 *Obtenção do módulo dinâmico com os valores de ν_{med}*

Para validação dos resultados e avaliação das hipóteses investigadas de tempo de voo a ser considerado da onda S, foi realizado um estudo independente das medições do tempo de voo da onda S. Nele, foram calculados novos valores de módulo dinâmico ($|E^*|_{ondas}$) com os valores de (ν_{med}), ângulo de fase e velocidade de onda P convertidos para a frequência compatível (34,4Hz), aplicados em conjunto com a densidade na Equação 12. Essa análise foi realizada para a 1^a perturbação e para a hipótese da interseção, tendo em vista que os erros para

a 2^a perturbação já foram identificados como superiores. Os valores de $|E^*|_{ondas}$ são comparados aos de $|E^*|_{34,4kHz}$ obtidos no modelo reológico 2S2P1D (ajustados aos resultados considerados como referência, obtidos para ensaios quase-estáticos de módulo complexo). Os resultados dessas análises são apresentados na Figura 21.

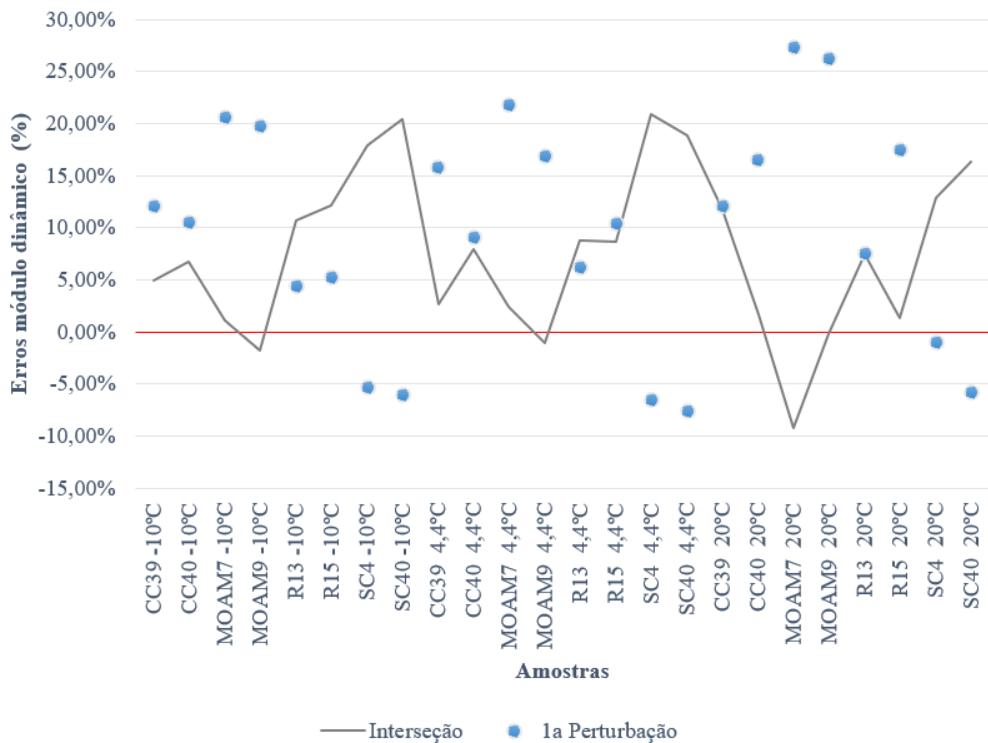
Observa-se que os valores de $|E^*|_{ondas}$ para a 1^a perturbação se aproximam dos valores de $|E^*|_{34,4kHz}$ para as misturas R e SC. Para as misturas CC e MO, os valores de $|E^*|_{34,4kHz}$ se aproximam para a hipótese do tempo de voo da onda S na interseção. Além disso, percebe-se uma nuvem de pontos em torno da medida considerada como referência, dispersos em cerca de 20% de variação de $|E^*|$. Tais variações são aceitáveis como desvios experimentais entre corpos-de-prova (MOHAMMAD *et al.*, 2013).

Em seguida, os erros produzidos (comparação do valor medido e do valor calculado de coeficiente de Poisson) foram calculados conforme a Equação 15. Os resultados constam na Figura 22.



Fonte: Autora (2022)

$$E |E^*|(\%) = \frac{|E^*|_{ondas} - |E^*|_{34,4kHz}}{|E^*|_{ondas}} \times 100 \quad (15)$$

Figura 22 – Erros resultantes entre $|E^*|_{\text{ondas}}$ e $|E^*|_{34,4\text{kHz}}$ 

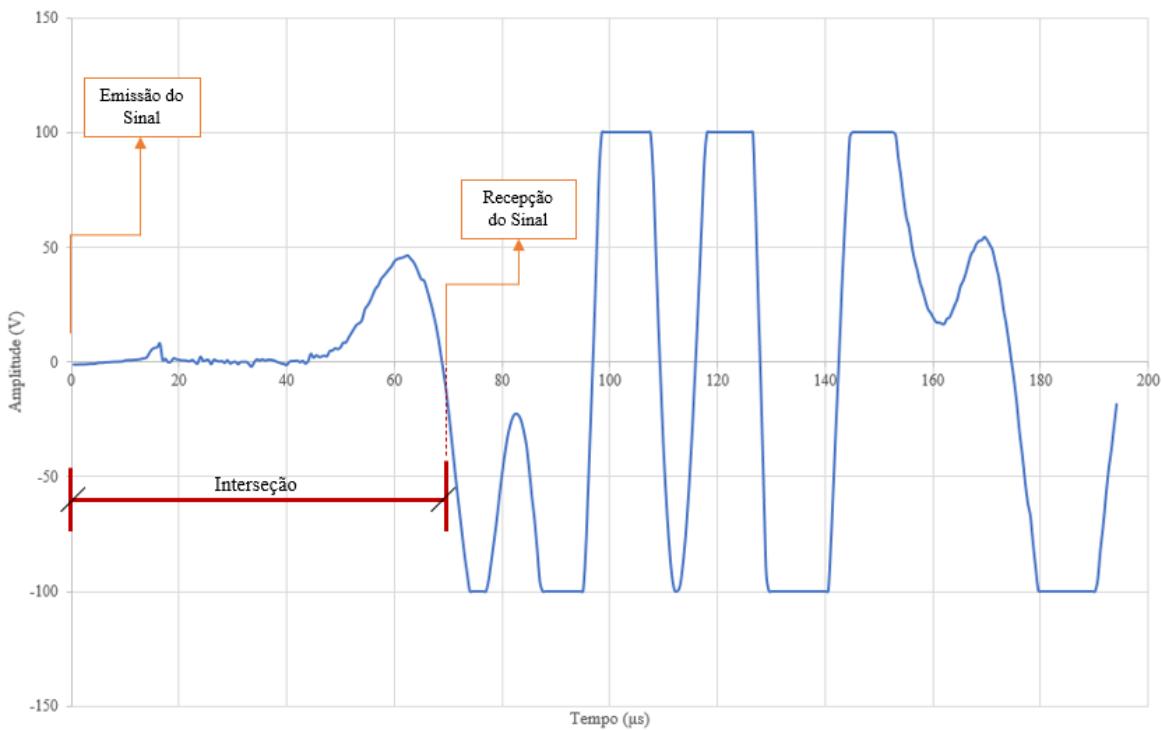
Fonte: Autora (2022)

Em relação aos novos valores de módulo dinâmico ($|E^*|_{\text{ondas}}$), obtidos agora de maneira simultânea aos valores de coeficiente de Poisson e sem necessidade de adoção de hipótese sobre o valor constante, os erros produzidos divergem para as hipóteses estudadas e para os tipos de misturas.

A hipótese de que o tempo de voo da onda S é na interseção do gráfico resultou em erros de 0 a 12% para as misturas CC e R, 1% a 9% para as misturas MO, e 13% a 21% para as misturas SC. A hipótese de que o tempo de voo equivale à primeira perturbação, seja esta um pico ou um vale (máximo ou mínimo) produziu erros de 9% a 16% para as misturas CC, 17% a 27% para MO, 4% a 17% para R e, para as misturas SC, de 0% a 8%.

Dessa forma, os resultados de $|E^*|_{\text{ondas}}$ são favoráveis para a consideração do tempo de voo da onda S na interseção do gráfico com a abcissa após a primeira perturbação (pico ou vale), conforme Figura 23.

Figura 23 – Hipótese do tempo de voo da onda S – Interseção



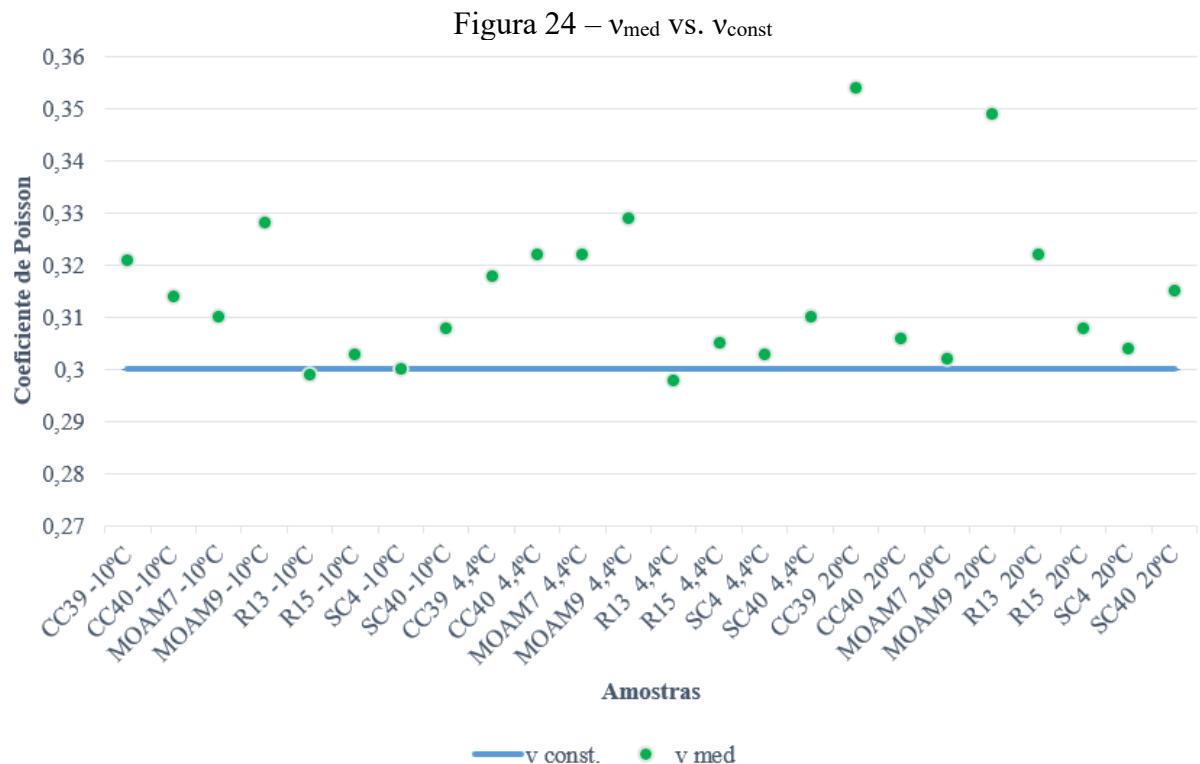
Fonte: Autora (2022)

Ressalta-se que os erros para a hipótese defendida por Mounier *et al.* (2012) e Pedraza (2018) também foram considerados aceitáveis. Os valores obtidos dos ensaios de propagação de ondas $|E^*|_{ondas}$ foram no máximo 27% superiores aos valores obtidos no modelo reológico 2S2P1D $|E^*|_{34,4kHz}$. Esse fenômeno também foi observado por Mounier *et al.* (2012) e Pedraza (2018), e pode ser consequência da não-linearidade típica de misturas asfálticas, para as quais quanto maior for o nível de deformação, menor será o módulo (MANGIAFICO *et al.*, 2017).

3.5.6 Estudo dos valores ν_{med} comparados ao coeficiente de Poisson constante

Conforme DNIT (2018), no banco de dados para misturas brasileiras utiliza-se o valor de 0,3 para coeficiente de Poisson, para ensaios de módulo de resiliência a 25°C. O referido parâmetro, por sua vez, não faz parte da entrada de dados, nos resultados do ensaio de módulo complexo (DNIT, 2019). Portanto, este valor de 0,3 é correntemente utilizado devido à medição experimental de ν não ser usual nacionalmente.

Dessa forma, a seguinte análise na Figura 24 visa avaliar as diferenças entre os valores de coeficiente de Poisson obtidos dos ensaios de propagação de ondas (hipótese da interseção) e o valor constante usualmente adotado no Brasil de 0,3.



Fonte: Autora (2022)

De uma forma geral, a faixa de valores de coeficiente de Poisson para as temperaturas estudadas varia de 0,298 a 0,354. Frisa-se que, apesar de parecer uma faixa pequena, se analisado isoladamente, o conhecimento desse coeficiente de Poisson (mesmo que pouco diferente de 0,3) é o que permite a estimativa mais exata do $|E^*|$, conforme explorado neste artigo.

De acordo com Rabelo *et al.* (2020), a consideração de v no valor usual de 0,3 resulta em erros de $|E^*|$ da ordem de -14,68% para baixas temperaturas e -28,35% para altas temperaturas. Além disso, foram estudados os valores de coeficiente de Poisson no intervalo de 0,25 a 0,40, que produziram erros de $|E^*|$ entre 30% para baixas temperaturas e 40% para altas temperaturas, resultantes de ensaios ultrassônicos.

3.6 Conclusões

Neste trabalho foram estudados 4 tipos de misturas asfálticas as quais foram submetidas ao ensaio convencional de módulo complexo quase-estático e, posteriormente, aos ensaios de propagação de ondas de compressão e de cisalhamento, tendo em vista as equações que relacionam as velocidades das ondas P e S e seus parâmetros reológicos ($|E^*|$ e ν).

As amostras foram testadas com sucesso nas temperaturas de -10°C, 4,4°C e 20°C. Porém, não foi possível a propagação de ondas nas temperaturas de 40°C e 54°C, com exceção das misturas com adição de cinzas para ondas P. As temperaturas das amostras foram controladas na UTM com tempo de condicionamento semelhante ao adotado em ensaios clássicos, de maneira a mitigar a ocorrência de um gradiente térmico interno.

Em relação aos ensaios de propagação de onda de compressão, os resultados de tempos de voo e velocidades de onda P já possuem uma metodologia consagrada na estimação do módulo dinâmico, desde que se adote por hipótese um valor de coeficiente de Poisson.

Além disso, neste trabalho, estudou-se a obtenção do coeficiente de Poisson por meio do ensaio de propagação da onda de cisalhamento. Para a definição do tempo de voo da onda S, são assumidas hipóteses, incluindo aquela normalmente considerada no uso automático dos equipamentos de ultrassom e outras levantadas na literatura para diferentes pontos do gráfico Amplitude vs. Tempo medido com o equipamento. Os pontos investigados para a medida do tempo de voo das ondas S foram: (i) primeiro desvio (típico dos equipamentos comerciais); (ii) primeira perturbação (pico ou vale); (iii) interseção do gráfico com a origem, entre a primeira e a segunda perturbações; e (iv) segunda perturbação (pico ou vale).

Partindo dessas hipóteses, os tempos de voo de onda S produziram valores de coeficiente de Poisson, posteriormente comparados com os resultados obtidos por um modelo 2S2P1D e dados experimentais de $|E^*|$, obtidos por ensaios quase-estáticos clássicos.

Em seguida, as hipóteses foram avaliadas pelos valores calculados de $|E^*|$ com os valores de ν calculados a partir das medições dos tempos de voo. A hipótese da interseção, defendida por Stephenson e Manke (1972), foi identificada como a que apresenta menores desvios comparativamente ao ensaio considerado como referência (quase-estático clássico). Esta hipótese produziu erros de 0 a 12% para as misturas CC (cinzas) e R (CAP 50/70 e agregado granítico), 1% a 9% para as misturas MO (CAP 50/70 e agregado granítico - UFAM) e 13% a 21% para as misturas SC (CAP 50/70 e agregado granítico).

Ressalta-se que as misturas R e SC apresentam características similares referentes aos constituintes (ligante puro e mesmo tipo de agregado) e volume de vazios superior a 5%, porém seus resultados divergem significativamente nos valores de $|E^*|$ e ν .

A hipótese da primeira perturbação defendida por Mounier *et al.* (2012) e Pedraza (2018), também produziu erros aceitáveis compatíveis com a literatura, porém superiores à hipótese da interseção, exceto para a mistura do tipo SC.

Dessa forma, a possibilidade da medição de onda S torna acessível a validação experimental da obtenção do $|E^*|$ sem a necessidade de adoção de hipóteses simplificadoras ou faixas de coeficiente de Poisson constantes, caracterizando assim a mistura asfáltica de forma mais aproximada com o comportamento viscoelástico linear.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Conclusões

Neste trabalho, foram aplicados ensaios ultrassônicos em misturas asfálticas com o objetivo de caracterizar o comportamento viscoelástico linear isotrópico, por meio dos parâmetros módulo dinâmico e coeficiente de Poisson. Os tempos de voo das ondas no interior da amostra são as únicas medidas utilizadas nas formulações que relacionam as propriedades do material (massa específica, módulo, coeficiente de Poisson e ângulo de fase) com a velocidade de propagação. Neste trabalho, esses resultados foram validados com os obtidos do ensaio de módulo dinâmico (DNIT, 2019), calibrados com o modelo reológico 2S2P1D, para cinco diferentes misturas asfálticas.

Na primeira etapa da pesquisa, analisaram-se as variações de rigidez por meio de ensaios ultrassônicos, verificando-se o efeito de variações de parâmetros reológicos adotados por hipótese (processo necessário na análise com apenas um tipo de onda, i.e., ondas de compressão) nos resultados de $|E^*|$, considerando o PSTT, que permitiu a montagem da curva mestra no ramo das altas frequências. Os valores de $|E^*|$ a partir da adoção de hipóteses simplificadoras, que envolveram considerar o ângulo de fase nulo e um valor constante de coeficiente de Poisson, resultou em erros de 8,6% para altas temperaturas e 3,4% para baixas temperaturas, o que é satisfatório em primeira aproximação, considerando sua variação com temperatura e frequência, para fins de controle tecnológico.

Na segunda etapa, estudou-se a obtenção simultânea de dois parâmetros reológicos de mistura (módulo dinâmico e coeficiente de Poisson), a partir de ensaios de propagação de ondas de compressão e de cisalhamento, validados com resultados do ensaio clássico (DNIT, 2019). Com essa técnica, já não se faz necessário adotar um valor de coeficiente de Poisson por hipótese.

Observou-se que o tempo de voo da onda S influencia significativamente nos valores de coeficiente de Poisson, sendo este tempo dependente da maneira como são feitas as leituras do gráfico gerado pelo ultrassom (Amplitudes vs. Tempo). Destaca-se que a resposta automática do equipamento (que determina o tempo de voo como sendo o tempo até o primeiro desvio observado no receptor) não pode ser utilizada como tempo de voo, como discorrido neste trabalho. A adoção direta dos resultados do equipamento (1º desvio para determinação do tempo de voo da onda S) gera valores de coeficiente de Poisson fisicamente inaceitáveis, e derivados apenas de um problema de técnica de leitura, conforme confirmado por ensaios realizados neste

trabalho e também discutido por outros autores na literatura. A consideração do tempo de voo da onda S na interseção do gráfico Amplitudes vs. Tempo com o eixo do tempo (entre a primeira e a segunda perturbações) produziu os menores erros (0% a 21%) para os valores calculados de $|E^*|$. Esses erros são compatíveis com variabilidades entre amostras e aceitáveis para fins de controle tecnológico. Além disso, a técnica permite a obtenção do $|E^*|$ sem a necessidade de adoção de hipóteses simplificadoras sobre valores fixos de coeficiente de Poisson, tornando o processo mais exato.

Nessa metodologia, os valores de $|E^*|$ apresentam alta sensibilidade ao valor de coeficiente de Poisson. Em outras metodologias, como o ensaio de MR (DNIT, 2018), adota-se o referido parâmetro como constante e no ensaio de módulo dinâmico (DNIT, 2019) os resultados não dependem do coeficiente de Poisson, exceto em modelagens tridimensionais, não realizadas no Brasil e ainda incomuns mesmo internacionalmente, exceto em alguns grupos de pesquisa. Ou seja: o coeficiente de Poisson tem grande interferência na medida indireta de módulo com a técnica ultrassônica, porém seu valor é normalmente ignorado. Isso sublinha a importância de que a medida simultânea de tempos de voo de ondas S e de ondas P sejam realizadas.

A construção da curva mestra de módulo dinâmico determinado com resultados dos ensaios ultrassônicos tem como limitação a necessidade da análise preliminar em laboratório, para a extração de dados experimentais de fatores de translação tempo-temperatura. Como já discorrido, essa limitação pode ser mitigada, por meio da criação de um banco de dados, onde as características do ligante asfáltico, podem ser associadas com misturas asfálticas de ligantes com características equivalentes (OLIVEIRA, 2019).

Por fim, conclui-se que os ensaios ultrassônicos são alternativas de baixo custo e confiáveis, além de ser uma solução não destrutiva, mais rápida e eficiente para determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas para fins de controle tecnológico. A técnica se mostra promissora para o estudo de misturas asfálticas e, se executada adequadamente, fornece a caracterização viscoelástica linear da mistura asfáltica em alguns pares frequência-temperatura com faixa de erros aceitáveis. Isso facilita o uso deste importante parâmetro capaz de considerar temperatura e frequência de carga, ambas sabidamente com elevado impacto no dimensionamento de pavimentos asfálticos. Trata-se de uma estratégia viável para futuros controles tecnológicos e avaliações de misturas asfálticas em campo, com técnica mais alinhada com filosofias mecanicistas de análise de pavimentos, quando comparada ao típico controle de composição realizado atualmente no estado da prática.

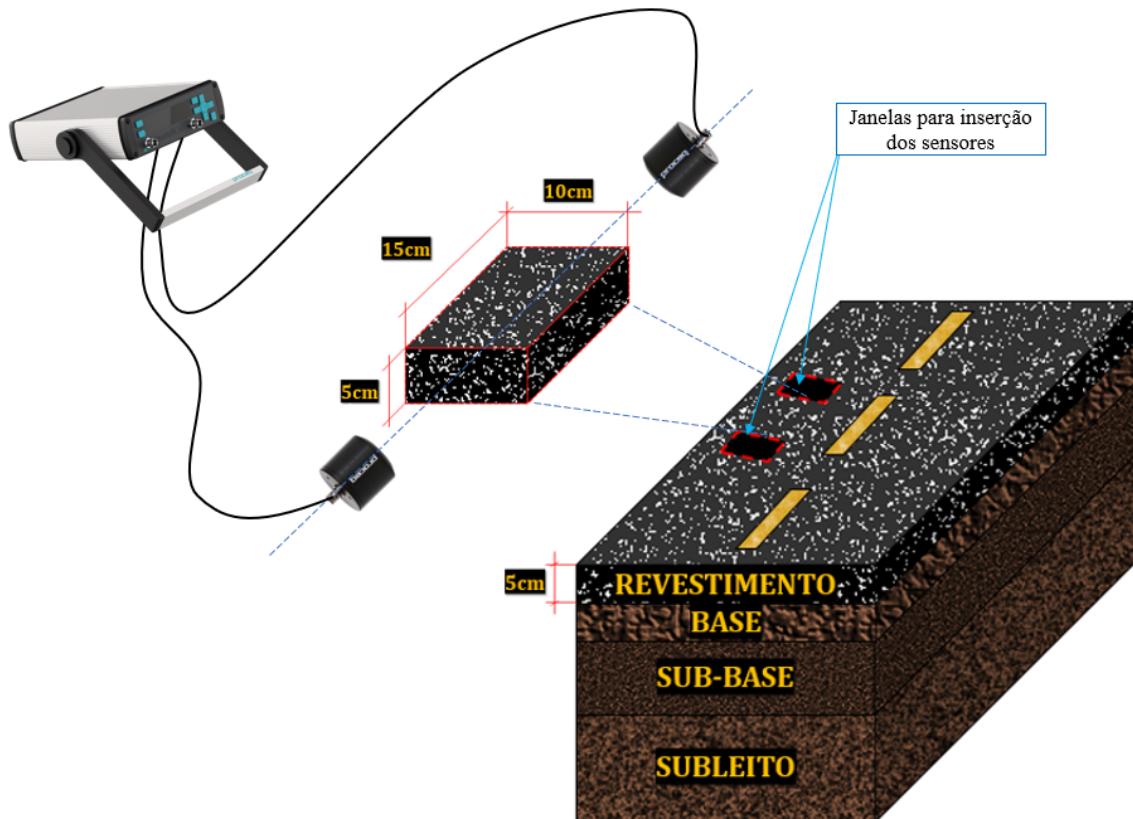
4.2 Recomendações de trabalhos futuros

No âmbito das metodologias Não Destrutivas, o presente trabalho fez uso de uma metodologia simples de ensaio por meio de propagação de ondas com uso do ultrassom. Desde mais de uma década também se estudam outros métodos ND, baseados nos modos de vibração e análise modal, que podem ser técnicas mais sofisticadas para uso em laboratório, enquanto as técnicas com ultrassom podem se concentrar nas aplicações de campo. Sendo assim, são apresentadas a seguir sugestões para trabalhos futuros.

- a) criar um banco de dados com os resultados do ensaio clássico (DNIT, 2019) calibrados no modelo 2S2P1D e construir a curva mestra com dados provenientes de ensaios de ondas ultrassônicas de compressão e cisalhamento, em múltiplas temperaturas. Isso permitirá utilizar informações compatíveis com cada composição de mistura investigada em campo para determinar os fatores de translação tempo-temperatura, que os ensaios com ultrassom não são capazes de determinar (principal limitação da técnica);
- b) verificar o efeito da variabilidade de propriedades volumétricas, sobretudo o volume de vazios ao longo de corpos de prova, uma vez que não se trata de um volume igualmente distribuído, nos parâmetros obtidos por meio do ensaio de ultrasom;
- c) estudar e aplicar os métodos *Resonant Ultrasonic Spectroscopy* (RUS) e *Resonant Acoustic Spectroscopy* (RAS) para a montagem da curva mestra do $|E^*|$ das misturas asfálticas. Serão técnicas em laboratório que se combinarão a técnicas de controle tecnológico e avaliação de campo com base nos ensaios ultrassônicos;
- d) implantar a metodologia de testes modais, com medições da Funções de Resposta de Frequência (FRF) e análise posterior com o Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de obter a curva mestra do $|E^*|$. Serão igualmente técnicas em laboratório que se combinarão a técnicas de controle tecnológico e avaliação de campo com base nos ensaios ultrassônicos. Estas já vêm sendo implantadas no grupo de pesquisa por meio de outra dissertação de mestrado;
- e) viabilizar a aplicação de testes ultrassônicos em campo por meio de pequenas aberturas de janela para inserção dos sensores e teste direto nos testemunhos dentro do revestimento. Para isso, é necessária uma geometria que permita a perfeita acoplagem dos dois transdutores de 50mm em cada extremidade do

testemunho. A técnica seria aplicável em pavimentos cujo revestimento seja de no mínimo 5cm de espessura. Assim, sugerem-se as dimensões apresentadas na Figura 25.

Figura 25 – Sugestão de geometria para teste ultrassônico em campo



Fonte: Autora (2022).

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO R 35**: Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures. Washington: AASHTO, 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 342**: Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). Washington: AASHTO, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **ASTM-C597**: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Washington, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **ASTM-E1876**: Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. Washington, 2015.

BABADOPULOS, L. F. A. L.; FERREIRA, W. L. G.; FREIRE, R. A.; BASTOS, J.; OLIVEIRA, J. A. de; CASTELO BRANCO, V. T. F. Avaliação do módulo dinâmico de misturas asfálticas a partir de diferentes modos de carregamento. **Anais do 21º Encontro de Asfalto**. Rio de Janeiro: IBP, p. 1-12, mai. 2014.

BABADOPULOS, L. F. A. L.; OROZCO, G.; SAUZÉAT, C.; DI BENEDETTO, H. Reversible phenomena and fatigue damage during cyclic loading and rest periods on bitumen. **International Journal of Fatigue**, Fortaleza, v. 124, p. 303–314, 2019, dez. 2018.

BEKELE, A.; RYDEN, N.; GUDMARSSON, A.; BIRGISSON, B. Effect of cyclic low temperature conditioning on stiffness modulus of asphalt concrete based on non-contact resonance testing method. **Construction and Building Materials**, Stockholm, v. 225. p. 502–509, jul. 2019.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 2 ed. Rio de Janeiro. ABEDA, 2010.

CARRET, Jean-Claude. **Linear viscoelastic characterization of bituminous mixtures from dynamic tests back analysis**. 2019. 219 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE), Universidade de Lyon, Lyon, 2019.

CARRET, J. C.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C. Linear viscoelastic behavior of asphalt mixes from dynamic frequency response functions. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, Lyon, v. 44, n. 7, p. 1019-1031, jan. 2020.

CASTILLO, D.; CARO, S. Probabilistic modeling of air void variability of asphalt mixtures in flexible pavements. **Construction and Building Materials**, Bogotá, v. 61, p. 138-146, mar. 2014.

CHEEKE, J. D. N. **Fundamentals and applications of Ultrasonic waves**. 2 ed. Florida. CRC Press I, 2002.

DI BENEDETTO H.; DELAPORTE B.; SAUZEAT C. Three-dimensional linear behaviour of

bituminous materials: experiments and modelling. **International Journal of Geomechanic**, Lyon, vol. 7, n. 2, p. 149-157, mar. 2007.

DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT., C.; SOHM, J. Stiffness of bituminous mixtures using ultrasonic wave propagation. **Road Materials and Pavement Design**, Lyon, v. 10, n. 4, p. 789-814, oct. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ME 135**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ME 416**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo dinâmico. Rio de Janeiro, 2019.

GOUVEIA, Beatriz Chagas Silva. **Métodos de previsão e determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras**. 2016. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

GOUVEIA, B. C. S.; GOECKS, P.; SOARES, J.B.; ARAGÃO, F. T. S. Calibration and validation of empirical models to predict the dynamic modulus of Brazilian asphalt concrete mixtures. *In: Transportation Research Board 97th Annual Meeting*, 2018, Washington DC. **Anais** [...]. Washington DC, 2018. p. 1-15.

GUDMARSSON, A.; RYDEN, N.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C. Complex modulus and complex Poisson's ratio from cyclic and dynamic modal testing of asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, Stockholm, v.88, p. 20-31, apr. 2015.

GUDMARSSON, Anders. **Resonance Testing of Asphalt Concrete**. 2014. 75 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Department of Transport Science, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2014.

HUANG, Yang. Huang. **Pavements analysis and design**. New Jersey: Englewood Cliffs/Pearson Prentice-Hall, 2003. 792p.

HUANG, Y. H.; DI BENEDETTO, H. **Advances in Asphalt Materials: Road and Pavement Construction**. 1 ed. Woodhead Publishing, 2015.

JIANG, Z.; PONNIAH, J.; CASCANTE, G.; HAAS, R. Nondestructive ultrasonic testing methodology for condition assessment of hot mix asphalt specimens. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Waterloo, v. 38, n. 7, p. 751–761, jul. 2011.

JURADO, Monica C. **Quantifying anisotropy in asphalt concrete pavements using an ultrasonic method**. 2008. 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Department Civil Engineering, University Of Texas At El Paso, 2008.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to geophysical exploration**. 3 ed. Blackwell Science ltd. 2002.

KIM Y. R. **Modeling of Asphalt Concrete.** 1. ed. New York: ASCE Press, McGraw-Hill Construction, Reston, 2009.

KWEON, G.; KIM, Y. R. Determination of asphalt concrete complex modulus with impact resonance test. **Transportation Research Record**, North Carolina, v. 1970, n. 1, p. 151-160, dec. 2006.

LARCHER, N.; TAKARLI, M.; ANGELLIER, N.; PETIT, C.; SEBBAH, H.; PETIT, C. Towards a viscoelastic mechanical characterization of asphalt materials by ultrasonic measurements. **Mater Struct**, Egletons, v. 48, p. 1377–1388, mai. 2015.

MANDEL, J. **Cours de mécanique des milieux continus.** 1. ed. Paris: Tome II: mécanique des solides, 1966.

MANGIAFICO, S.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; SAUZÉAT, C.; DI BENEDETTO, H. Nonlinearity of bituminous mixtures. **Mechanics of Time-Dependent Materials**, Lyon, v. 22, n. 1, p. 29-49. jul. 2018.

MEDINA, J. R.; UNDERWOOD, B. S.; MAMLOUK, M. Estimation of asphalt concrete modulus using the ultrasonic pulse velocity test. **Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements**, Tempe, v. 144, ed. 2, p. 1–9. fev. 2018.

MOHAMMAD, L.N., ELSEIFI, M., COOPER III, S.B, RAGHAVENDRA, A. Levels of Variability in Volumetric and Mechanical Properties of Asphalt Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Baton Rouge, v. 25, n. 10, p. 1424-1431, set. 2013.

MOUNIER, D.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C. Determination of bituminous mixtures linear properties using ultrasonic wave propagation. **Construction and Building Materials**, Lyon, v. 36, p. 638-647, jan. 2012.

MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. F. M.; FRANCO, F. A. C. P.; SILVA, C. F. S. C.; MEDINA, J. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos.** Universidade Federal do Rio de Janeiro: Convênio UFRJ/DNIT, 2018.

NGUYEN, Q. T.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C. Linear and nonlinear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures. **Materials and Structures**, Lyon, v. 48, n. 7, p.2339-2351. may. 2015.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; CASTRO-FRESNO, D.; VEGA-ZAMANILLO, A.; CELAYA, M.; LOMBILLO-VOZMEDIANO, I. Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test. **Ndt & E International**, Santander, v. 43, n.7, p.629-634. out. 2010.

OLIVEIRA, Letícia Sousa de. **Efeito dos períodos de repouso no ensaio de fadiga em misturas asfálticas e em ligantes.** 2019. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

PAPAZIAN, H. S. 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 I. *Anais* [...], 1962, Michigan, p. 454-63.

PEDRAZA, Alvaro. **Propriétés thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés. Mécanique des matériaux.** 2018. 366 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE), Universidade de Lyon, Lyon, 2017.

PUNDIT, Lab. **Instruções operacionais.** Proceq SA, 2017. Disponível em: <https://www.manualslib.com/manual/2990613/Proceq-Pundit-Lab.html>. Acesso em: 20 de junho de 2022

PUNDIT, Lab. **Ultrasonic transducers data sheets.** Proceq SA, 2018. Disponível em: <https://www.manualslib.com/manual/2990613/Proceq-Pundit-Lab.html>. Acesso em: 20 de junho de 2022

RIBEIRO, Antônio Junior Alves. **Um Modelo de previsão do módulo de resiliência dos solos no estado do Ceará para fins de pavimentação.** 2016. 151 p. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

RYDEN, N. Resonant frequency testing of cylindrical asphalt samples. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, Lund, v. 15, n. 4, p. 587-600, nov. 2011.

SANTIAGO, L. S.; BABADOPULOS, L. F. de A. L.; SOARES, J. B. Desenvolvimento de função de transferência para previsão de área trincada em pavimentos asfálticos por meio da simulação do dano por fadiga utilizando modelo S-VECD e análises elásticas. **Transportes**, Fortaleza, v. 28, n. 3, p. 121-136, ago. 2020.

SANTOS, Anthony Belo Vasconcelos. **Contribuições para um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos:** influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada. 2020. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

SILVA, L. S. V.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. Efeito do uso de corpos de prova moldados e extraídos na caracterização mecânica de misturas asfálticas. **Transportes**, Fortaleza, v. 30, n. 1, p. 2620-2620, fev. 2022.

SPECHT, L. P.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C.; SOARES, J. B. Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes. **Construction and Building Materials**, Santa Maria, v. 149, p. 648–658, set. 2017.

STEPHENSON, R. W.; MANKE, P. G. Ultrasonic moduli of asphalt concrete. In: Transportation Research Board 51th Annual Meeting, 2018, Washington DC. *Anais* [...]. Washington DC, 1972. p. 1-14.

THEISEN, Klaus Machado. **Estudo de parâmetros constitutivos extraídos de dados experimentais no comportamento de misturas asfálticas.** 2011. 311 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal

do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

WILLIAM, M. L.; LANDEL, R. F.; FERRY, J. D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. **J. of American Chemistry Society**, Madison, v. 20, n.14, p. 3701-3707. jul. 1955.