

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

KAREN FERNANDA BOMPAN

Avaliação do efeito acustoelástico em elementos de concreto usando a propagação de ondas ultrassônicas pelos métodos de transmissão direta e indireta

São Carlos
2021

KAREN FERNANDA BOMPAN

Avaliação do efeito acustoelástico em elementos de concreto usando a propagação de ondas ultrassônicas pelos métodos de transmissão direta e indireta

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Guilherme Haach.

São Carlos
2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B695a Bompan, Karen Fernanda
Avaliação do efeito acustoelástico em elementos
de concreto usando a propagação de ondas ultrassônicas
pelos métodos de transmissão direta e indireta / Karen
Fernanda Bompan; orientador Vladimir Guilherme Haach.
São Carlos, 2021.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de
Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.

1. Acustoelasticidade. 2. Concreto. 3. Avaliação
de tensões. 4. Ultrassom. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **KAREN FERNANDA BOMPAN**.

Título da tese: "Avaliação do efeito acustoelástico em elementos de concreto usando a propagação de ondas ultrassônicas pelo método de transmissão direta e indireta".

Data da defesa: 21/01/2021.

Comissão Julgadora	Resultado
Prof. Associado Vladimir Guilherme Haach (Orientador) (Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)	<u><i>Aprovada</i></u>
Prof. Titular Humberto Breves Coda (Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)	<u><i>Aprovada</i></u>
Prof. Dr. Roberto Caldas de Andrade Pinto (Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)	<u><i>Aprovada</i></u>
Profa. Dra. Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira (Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)	<u><i>Aprovada</i></u>
Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Júnior (Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)	<u><i>Aprovada</i></u>
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas): Prof. Associado Vladimir Guilherme Haach Presidente da Comissão de Pós-Graduação: Prof. Titular Murilo Araujo Romero	

Dedicado este trabalho aos meus queridos pais, Bárbara e Luiz

Agradecimentos

À Deus por me guiar durante mais esta caminhada.

Ao professor Vladimir pela valiosa orientação, conhecimentos transmitidos, por toda a atenção e disponibilidade constantes ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus queridos pais, Bárbara e Luiz. Todo o amor, carinho, apoio e incentivo aos meus estudos foram fundamentais para a conclusão de mais uma etapa tão importante em minha vida. Muito obrigada.

Ao meu amado companheiro, José Antonio (Nene), pelo grande incentivo e apoio ao longo dos meus anos de estudo, compreensão, amor e carinho, independente da distância. Obrigada por estar sempre presente.

Aos meus queridos irmãos, Karina e Bruno por todo o amor, apoio e companheirismo. Você sempre estiveram ao meu lado, muito obrigada.

Aos amigos que conheci no SET durante meu mestrado e doutorado pela troca de experiências, momentos compartilhados e auxílio durante o trabalho desenvolvido.

Aos professores do SET pelos importantes conhecimentos transmitidos.

Ao funcionários do Laboratório de Estruturas do SET, Luiz Vareda, Amaury, Romeu, Fabiano, Jorge e Mauri pelo suporte com as concretagens e os ensaios.

Ao Masaki, Dorival, Melina e aos funcionários da secretaria pela ajuda e suporte.

Ao CNPq, pela bolsa de doutorado concedida.

RESUMO

BOMPAN, K. F. **Avaliação do efeito acustoelástico em elementos de concreto usando a propagação de ondas ultrassônicas pelos métodos de transmissão direta e indireta.** 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

O desenvolvimento da teoria da acustoelasticidade por Hughes e Kelly (1953) revelou a possibilidade da avaliação de tensões nos materiais usando o ultrassom. O efeito acustoelástico no concreto vem sendo estudado, mas, ainda é preciso obter um conhecimento muito maior sobre este fenômeno neste material para que a avaliação de tensões em estruturas de concreto *in situ* possa se tornar factível. O efeito acustoelástico precisa ser avaliado usando os métodos de transmissão direta e indireta das ondas ultrassônicas. Afinal, na prática, nem sempre será possível emitir as ondas nos elementos pelo método direto. Apesar disto, faltam estudos sobre o efeito acustoelástico no concreto usando o método indireto. Portanto, o objetivo deste trabalho foi investigar o efeito acustoelástico no concreto usando os métodos de transmissão direta e indireta. Ensaio ultrassônicos foram realizados de 3 maneiras em prismas de concreto submetidos à diferentes níveis de carregamento uniaxial de compressão: usando apenas o método de transmissão direta; ambos os métodos de transmissão, direta e indireta, e apenas o método de transmissão indireta com diferentes distâncias entre os transdutores. Verificou-se que a curva da variação relativa da velocidade em função da tensão precisa ser estabilizada e que a aplicação de 10 ciclos sequenciais de carregamento e descarregamento garante a estabilização. A curva para a fase de descarregamento se mostrou mais favorável para ser utilizada na análise de tensões. O efeito acustoelástico observado com o uso do método indireto se revelou bem maior do que o obtido pelo método direto. Além disto, ele foi influenciado pela distância de percurso das ondas. Foram encontradas equações empíricas para a obtenção da tensão no concreto com o ultrassom e uma formulação para se obter a tensão por meio do tensor constitutivo sem depender das constantes de Murnaghan (l , m e n) foi proposta. Este trabalho contribui com o conhecimento teórico sobre a acustoelasticidade, proporciona um avanço no conhecimento sobre o efeito acustoelástico no concreto e auxilia no desenvolvimento de procedimentos de ensaio mais confiáveis para o estudo do fenômeno neste material.

Palavras chave: Acustoelasticidade. Concreto. Avaliação de tensões. Ultrassom.

ABSTRACT

BOMPAN, K. F. **Evaluation of acoustoelastic effect in concrete elements using direct and indirect transmission method of propagation of ultrasonic waves.** 2021. Thesis (Doctorate in Structural Engineering) – School of Engineering of São Carlos, University of Sao Paulo, Sao Carlos, 2021.

The development of the theory of acoustoelasticity by Hughes and Kelly (1953) revealed the possibility of stress evaluation in materials using ultrasound. The acoustoelastic effect on concrete has been studied, but a significantly deeper knowledge on this phenomenon in this material is still necessary to enable stress evaluation in *in situ* concrete structures. The acoustoelastic effect is required to be evaluated using both direct and indirect wave transmission methods, because, in practice, not always is possible to emit ultrasonic waves in the elements via direct method. Nevertheless, there is a clear lack of studies on the acoustoelastic effect applied to concrete using the indirect transmission method in the literature. Therefore, this work aimed to investigate the acoustoelastic effect in the concrete using the direct and indirect transmission methods. Ultrasonic tests were performed on three different manners on concrete prisms subjected to different levels of compressive uniaxial loading: using only the direct transmission method, using both the direct and indirect transmission methods and using only the indirect transmission method with different distances between the transducers. The curve of the relative variation of velocity as a function of stress requires stabilization, and the application of 10 sequential loading-unloading cycles ensures stabilization. The curve at the unloading phase has proved to be more favorable for use in stress analysis. The acoustoelastic effect observed with the use of the indirect method proved to be much greater than that obtained using the direct method. Furthermore, the acoustoelastic effect was influenced by the wave travel distance. Empirical equations to obtain the stress in the concrete with the ultrasound were found, and a formulation for obtaining the stress by means of the constitutive tensor without depending on the Murnaghan constants (l , m and n) was proposed. This work contributes with the theoretical knowledge about the acoustoelastic theory, provides an advance in the knowledge about the acoustoelastic effect in the concrete and assists in the development of more reliable test procedures for the study of the phenomenon in this material.

Keywords: Acoustoelasticity. Concrete. Stress analysis. Ultrasound.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxograma da pesquisa.....	39
Figura 2.1 - Parâmetros das ondas.....	42
Figura 2.2 - Onda longitudinal.	44
Figura 2.3 - Onda de cisalhamento.....	44
Figura 2.4 - Esquema de ensaio ultrassônico.	46
Figura 2.5 - Arranjos dos transdutores (E = emissor; R = receptor): (a) transmissão direta; (b) transmissão indireta (c) transmissão semidireta.	47
Figura 2.6 - Equipamentos do ensaio ultrassônico.....	48
Figura 2.7 – Transdutor de ultrassom.....	48
Figura 2.8 - Cristal piezoelétrico: (a) efeito piezoelétrico reverso e (b) efeito piezoelétrico...49	
Figura 2.9 - Sinal do pulso de ondas recebido pelo transdutor de cisalhamento.....	50
Figura 2.10 - Comparação de dois sinais ultrassônicos por meio das ondas diretas e das onda coda.....	51
Figura 4.1 – Equipamento de ultrassom PundtLab ⁺ e 2 caixas seletoras de sinal ultrassônico.	97
Figura 4.2 - Esquema de funcionamento das caixas seletoras.....	98
Figura 4.3 – (a) Transdutor de cisalhamento de 250 kHz e (b) Pulso de ondas ultrassônicas recebido pelo transdutor de cisalhamento.....	98
Figura 4.4 – (a) Transdutor longitudinal de 250 kHz e (b) Esquema da fixação dos transdutores de deslocamento em cada prisma ensaiado. Medidas em cm.	99
Figura 4.5 – Procedimento de calibração do equipamento de ultrassom usando o cilindro de calibração.	99
Figura 4.6 – Aparato experimental: (a) Máquina Instron, modelo 300HVL e (b) Peça de aço em U (medidas em centímetros).	100
Figura 4.7 – Aparato experimental: (a) peça de isopor usada para fixar os transdutores localizados nas faces de extremidade do prisma, (b) ganchos metálicos usados para fixar os transdutores nas faces laterais do prisma durante o ensaio pelo método de transmissão direta e (c) Faixas de borracha usadas para fixar os transdutores nas faces laterais do prisma durante os ensaios pelo método de transmissão direta e indireta (à esquerda) e o método de transmissão indireta apenas (à direita).	100

Figura 4.8 - Nomenclatura das ondas ultrassônicas emitidas ao longo dos eixos 1 e 2 do prisma.	102
Figura 4.9 - Ondas ultrassônicas emitidas para cada valor de força aplicada no prisma durante o carregamento e o descarregamento e no prisma sem tensão, imediatamente antes e após o carregamento e o descarregamento, respectivamente.....	102
Figura 4.10 – Posição das aberturas das peças de aço em U, colocadas acima e abaixo dos prismas para permitir o acoplamento dos transdutores nas faces de extremidade dos prismas no ensaio pelo método direto.	103
Figura 4.11 – Configuração de ensaio num prisma para aplicação do método da transmissão direta.....	103
Figura 4.12 – Esquema da aplicação dos 13 ciclos de carregamento e descarregamento no prisma C4P1.....	104
Figura 4.13 – Esquema da aplicação dos ciclos e ensaios no primeiro dia de ensaio (Dia 1) no prisma C2P1.....	106
Figura 4.14 – Esquema da aplicação dos ciclos e ensaios no segundo dia de ensaio (Dia 2), realizado 42 dias após o Dia 1, no prisma C2P1.....	106
Figura 4.15 – Esquema da aplicação dos ciclos num mesmo prisma, ensaiado pelo método de transmissão direta (“Direta”), pelos métodos de transmissão direta e indireta (“Direta+Indireta”) e apenas pelo método de transmissão Indireta (“Indireta”).....	107
Figura 4.16 – Propagação das ondas longitudinais entre transdutores posicionados pelo método de transmissão indireta.	109
Figura 4.17 – Sinal ultrassônico recebido ao emitir as ondas pelo método direto no prisma C1P4 sem tensão imediatamente após o término do descarregamento do prisma.....	110
Figura 4.18 - Sinal ultrassônico recebido ao emitir as ondas pelo método indireto no prisma C1P4 sem tensão imediatamente após o término do descarregamento do prisma.....	110
Figura 4.19 - Ensaios pelo método de transmissão direta e indireta: (a) Configuração de ensaio. A medida está em centímetros; (b) Ondas ultrassônicas analisadas por ambos os métodos de transmissão.....	111
Figura 4.20 – Configuração de ensaio num prisma ensaiado usando os métodos de transmissão direta e indireta: (a) face com os transdutores posicionados pelo arranjo indireto e (b) face oposta à mostrada em (a).	112
Figura 4.21 – Configuração de ensaio usando apenas o método de transmissão indireta. E e R indicam “emissor” e “receptor”, respectivamente. As medidas estão em centímetros e indicam a distância entre as faces dos transdutores.	113
Figura 4.22 – Configuração de ensaio num prisma usando apenas o método de transmissão indireta: (a) transdutores espaçados de 42.8 cm e 15 cm, (b) transdutores espaçados de 25 cm (face oposta à mostrada em (a)) e (c) vista do prisma com os 3 pares de transdutores usados no ensaio.	115

Figura 4.23 – Procedimento usado para a determinação do tempo de chegada das ondas longitudinais e de cisalhamento: (a) sinal ultrassônico $f(t)$ e (b) $h(t)$	117
Figura 4.24 – Procedimento usado para a determinação do tempo de chegada das ondas longitudinais e de cisalhamento: (a) $g(z)$ e (b) $w(z)$	117
Figura 5.1 - Variação relativa de velocidade em função da tensão para: (a) OL_{11} e (b) OC_{12}	121
Figura 5.2 - Variação relativa de velocidade em função da tensão para: (a) OL_{22} e (b) OC_{21}	121
Figura 5.3 - Variação relativa de velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento (em azul) e após o descarregamento (em verde) para cada ensaio usando a velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento do ensaio 1 como referência. Os tipos de ondas ultrassônicas são: (a) OC_{12} e (b) OC_{21}	123
Figura 5.4 - Variação relativa de velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento (em azul) e após o descarregamento (em verde) para cada ensaio usando a velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento do ensaio 1 como referência. Os tipos de ondas ultrassônicas são: (a) OL_{11} e (b) OL_{22}	124
Figura 5.5 - Curvas estabilizadas para: (a) OL_{11} (ensaios 4 ao 13) e (b) OC_{12} (ensaios 4 ao 13).	127
Figura 5.6 - Curvas estabilizadas para: (a) OL_{22} (ensaios 7 ao 13) e (b) OC_{21} (ensaios 9 ao 13).	128
Figura 5.7 - Variação relativa da velocidade e as correspondentes variações máximas de tensão obtidas a partir das curvas estabilizadas das ondas OC_{12} e OL_{22}	128
Figura 5.8: Variação relativa da velocidade em função da tensão durante o carregamento dos ensaios 1 ao 13 usando como sinal de referência (Ref) as ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento de cada ensaio (marcadores circulares) e as ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento do ensaio 1 (marcadores triangulares) para as ondas: (a) OC_{12} e (b) OC_{21}	129
Figura 5.9: Variação relativa da velocidade em função da tensão durante o carregamento dos ensaios 1 ao 13 usando como sinal de referência (Ref) as ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento de cada ensaio (marcadores circulares) e as ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento do ensaio 1 (marcadores triangulares) para as ondas: (a) OL_{11} e (b) OL_{22}	133
Figura 5.10 – Variação relativa de velocidade em função do número de ciclos de carregamento para um mesmo valor de tensão aplicado no prisma para as ondas: (a) OL_{11} e (b) OC_{12}	135
Figura 5.11 – Variação relativa de velocidade em função do número de ciclos de carregamento para um mesmo valor de tensão aplicado no prisma para as ondas: (a) OL_{22} e (b) OC_{21}	137

Figura 5.12 – Variação relativa de velocidade em função do número de ciclos de carregamento para um mesmo valor de tensão aplicado no prisma com a mesma escala no eixo vertical para as ondas: (a) OL ₁₁ e (b) OC ₁₂	137
Figura 5.13 – Variação relativa de velocidade em função do número de ciclos de carregamento para um mesmo valor de tensão aplicado no prisma para as ondas: (a) OL ₂₂ e (b) OC ₂₁	138
Figura 5.14 - Curvas estabilizadas e curva média para (a) OL ₁₁ e (b) OC ₁₂	138
Figura 5.15 - Curvas estabilizadas e curva média para (a) OL ₂₂ e (b) OC ₂₁	139
Figura 5.16 - Tensões correspondentes à variação relativa de velocidade de 0.25% das ondas OC ₁₂ , onde: 15.5 MPa e 17.5 MPa são os valores extremos do intervalo de tensões no qual as curvas estão contidas e 16.5 MPa é a tensão obtida pela curva média, em preto.	139
Figura 5.17 – Curvas médias para as ondas OL ₁₁ , OC ₁₂ , OL ₂₂ e OC ₂₁	141
Figura 5.18 -Variação relativa da velocidade das ondas OL ₁₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 1 e (b) 11.	143
Figura 5.19 - Sinais ultrassônicos das ondas OL ₁₁ obtidos para cada valor de carregamento atuante no prisma durante as fases de carregamento e descarregamento do ensaio 11. As legendas indicam a força aplicada em kN.	144
Figura 5.20- Tensão em função da deformação durante o carregamento e o descarregamento do prisma dos ensaios 1 ao 13.	145
Figura 5.21- Variação relativa de velocidade em função da tensão na fase de descarregamento para: (a) OL ₁₁ e (b) OC ₁₂	148
Figura 5.22- Variação relativa de velocidade em função da tensão na fase de descarregamento para: (a) OL ₂₂ e (b) OC ₂₁	148
Figura 5.23- Curvas estabilizadas para: (a) OL ₁₁ (ensaios 4 ao 13) e (b) OC ₁₂ (ensaios 4 ao 13).	149
Figura 5.24 - Curvas estabilizadas para: (a) OL ₂₂ (ensaios 7 ao 13) e (b) OC ₂₁ (ensaios 9 ao 13).	149
Figura 5.25- Curvas médias para as ondas OL ₁₁ , OC ₁₂ , OL ₂₂ e OC ₂₁ para a fase de descarregamento.	150
Figura 5.26- Curvas estabilizadas para as fases de carregamento e descarregamento: (a) OL ₁₁ e (b) OC ₁₂	150
Figura 5.27- Curvas estabilizadas para as fases de carregamento e descarregamento: (a) OL ₂₂ e (b) OC ₂₁	151

- Figura 5.28- Gráficos para as ondas OL₁₁: (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma. 151
- Figura 5.29- Gráficos para as ondas OC₁₂: (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma. 152
- Figura 5.30- Gráficos para as ondas OL₂₂: (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma. 152
- Figura 5.31- Gráficos para as ondas OC₂₁: (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma. 152
- Figura 5.32- Desvio, em porcentagem, em função da tensão estimada no prisma para as ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁. 154
- Figura 5.33- Variação relativa de velocidade em função da tensão para as ondas emitidas no prisma nos ciclos 1, 11 e 12: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂. 156
- Figura 5.34- Variação relativa de velocidade em função da tensão para as ondas emitidas no prisma nos ciclos 1, 11 e 12: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁. 156
- Figura 5.35- Variação relativa de velocidade em função da tensão usando os sinais para 0 MPa e 3.6 MPa como referência: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂. 158
- Figura 5.36- Variação relativa de velocidade em função da tensão usando os sinais para 0 MPa e 4.4 MPa como referência: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁. 158
- Figura 5.37- Variação relativa de velocidade em função da tensão usando os sinais para 0 MPa, 3.6 MPa e 4.4 MPa como referência: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂. 160
- Figura 5.38- Variação relativa de velocidade em função da tensão usando os sinais para 0 MPa, 4.4 MPa e 7.1 MPa como referência: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁. 160
- Figura 5.39- Sinais ultrassônicos obtidos do prisma sem tensão (0 MPa), com 3.6 MPa e 10.7 MPa para as ondas OL₁₁: (a) no ciclo 12 e (b) no ciclo 11. 161
- Figura 5.40- Variação relativa de velocidade em função da tensão nos ensaios 1 ao 7 para as ondas: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂. 163
- Figura 5.41- Variação relativa de velocidade em função da tensão nos ensaios 1 ao 7 para as ondas: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁. 163
- Figura 5.42- Variação relativa de velocidade em função da tensão das curvas estabilizadas com os eixos na mesma escala para: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂ 166

Figura 5.43- Variação relativa de velocidade em função da tensão das curvas estabilizadas com os eixos na mesma escala para: (a) OL ₂₂ e (b) OC ₂₁	167
Figura 5.44- Variação relativa de velocidade em função da tensão na fase de descarregamento para: (a) OL ₁₁ e (b) OC ₁₂	167
Figura 5.45- Variação relativa de velocidade em função da tensão na fase de descarregamento para: (a) OL ₂₂ e (b) OC ₂₁	168
Figura 5.46- Curvas estabilizadas para as fases de carregamento e descarregamento: (a) OL ₁₁ e (b) OC ₁₂	170
Figura 5.47- Curvas estabilizadas para as fases de carregamento e descarregamento: (a) OL ₂₂ e (b) OC ₂₁	170
Figura 5.48- Gráficos para as ondas OL ₁₁ : (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.	171
Figura 5.49- Gráficos para as ondas OC ₁₂ : (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.	171
Figura 5.50- Gráficos para as ondas OL ₂₂ : (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 12 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.	171
Figura 5.51- Gráficos para as ondas OC ₂₁ : (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.	172
Figura 5.52- Desvio, em porcentagem, em função da tensão estimada no prisma para as ondas OL ₁₁ , OC ₁₂ , OL ₂₂ e OC ₂₁	173
Figura 5.53– Variação relativa da velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da tensão aplicada (σ) nas fase de descarregamento para as ondas: (a) OL ₁₁ e (b) OC ₁₂	177
Figura 5.54 – Variação relativa da velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da tensão aplicada (σ) nas fases de descarregamento para as ondas: (a) OL ₂₂ e (b) OC ₂₁	177
Figura 5.55 – Variação relativa da velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da porcentagem de tensão aplicada (σ/f_{cm}) nas fase de descarregamento para as ondas: (a) OL ₁₁ e (b) OC ₁₂	178
Figura 5.56 - Variação relativa da velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da porcentagem de tensão aplicada (σ/f_{cm}) nas fases de descarregamento para as ondas: (a) OL ₂₂ e (b) OC ₂₁ ...	178
Figura 5.57 – Valor de C ₁₁₁₁ em função da tensão aplicada em cada prisma.	180

Figura 5.58 - Variação relativa de velocidade em função da tensão das ondas OL_{11} , OC_{21} , OC_{12} e OL_{22} para os prismas do concreto: (a) C1 e (b) C2.....	181
Figura 5.59 - Variação relativa de velocidade em função da tensão das ondas OL_{11} , OC_{21} , OC_{12} e OL_{22} para os prismas do concreto: (a) C3 e (b) C5.....	182
Figura 5.60 - Variação relativa de velocidade em função da tensão das ondas OL_{11} , OC_{21} , OC_{12} e OL_{22} para os prismas do concreto: (a) C6 e (b) C7.....	182
Figura 5.61 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.3 (caso 1 – OC_{21}).....	185
Figura 5.62 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.4 (caso 2 – OC_{21}).....	185
Figura 5.63 - Intervalos de erros relativos das medidas de tensão calculadas para cada intervalo de 2.5% de tensão real aplicada no concreto ao usar para o cálculo da tensão: (a) equação 5.3 (caso 1- OC_{21}) e (b) equação 5.4 (caso 2 - OC_{21}).	186
Figura 5.64- Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.3, em rosa, e a equação 5.5, em azul, (caso 1– OC_{21})..	187
Figura 5.65 - Intervalos de erros relativos das medidas de tensão calculadas para cada intervalo de 2.5% de tensão real aplicada no concreto ao usar para o cálculo da tensão a equação 5.5 até 25% f_{cm} e a equação 5.3 acima de 25% f_{cm} (caso 1– OC_{21}).	188
Figura 5.66 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.4, em rosa, e a equação 5.6, em azul, (caso 2– OC_{21})..	189
Figura 5.67 - Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 1 (OC_{21}) ao usar as equações 5.5 e 5.3 quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} e maiores que 25% f_{cm} , respectivamente.	190
Figura 5.68 - Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 2 (OC_{21}) ao usar a equação 5.4 para todo o carregamento.	190
Figura 5.69 - – Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.7, em rosa, e a equação 5.9, em azul, (caso 1– OL_{11}). .	192
Figura 5.70 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.8, em rosa, e a equação 5.10, em azul, (caso 2– OL_{11}).193	
Figura 5.71 - Intervalos de erros relativos das medidas de tensão calculadas para cada intervalo de 2.5% de tensão real aplicada no concreto ao usar para o cálculo da tensão: (a) a equação 5.9 até 25% f_{cm} e a equação 5.7 acima de 25% f_{cm} (caso 1 – OL_{11}) e (b) a equação 5.10, até 25% f_{cm} e a equação 5.8, acima de 25% f_{cm} (caso 2 – OL_{11})	194
Figura 5.72 -Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 1 (OL_{11}) ao usar as equações 5.9 e 5.7 quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} e maiores que 25% f_{cm} , respectivamente.	195

Figura 5.73 -Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 2 (OL ₁₁) ao usar as equações 5.10 e 5.8 quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} e maiores que 25% f_{cm} , respectivamente.	195
Figura 5.74 – Elemento do tensor constitutivo do material sem tensão (C^0) em função da resistência à compressão média do concreto (f_{cm}).	197
Figura 5.75 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.11, em rosa, e a equação 5.13, em azul, (caso 3 – OC ₂₁).	199
Figura 5.76 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real ao usar a equação 5.12, em rosa, e a equação 5.14, em azul, (caso 4 – OC ₂₁).	200
Figura 5.77 - Intervalos de erros relativos das medidas de tensão calculadas para cada intervalo de 2.5% de tensão real aplicada no concreto ao usar para o cálculo da tensão: (a) a equação 5.13 até 25% f_{cm} e a equação 5.11 acima de 25% f_{cm} (caso 3 – OC ₂₁) e (b) a equação 5.14 ao longo de todo o carregamento (caso 4 – OC ₂₁).	200
Figura 5.78 – Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 3 (OC ₂₁) ao usar as equações 5.13 e 5.11 quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} e maiores que 25% f_{cm} , respectivamente.	201
Figura 5.79 – Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 4 (OC ₂₁) ao usar a equação 5.14 ao longo de todo o carregamento.	201
Figura 5.80 – Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real ao usar a equação 5.15, em rosa, e a equação 5.17, em azul, (caso 3 – OL ₁₁).	202
Figura 5.81 – Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real ao usar a equação 5.16, em rosa, e a equação 5.18, em azul, (caso 4 – OL ₁₁).	203
Figura 5.82 - Intervalos de erros relativos das medidas de tensão calculadas para cada intervalo de 2.5% de tensão real aplicada no concreto ao usar para o cálculo da tensão: (a) a equação 5.17 até 25% f_{cm} e a equação 5.15 acima de 25% f_{cm} (caso 3 – OL ₁₁) e (b) a equação 5.18 até 25% f_{cm} e a equação 5.16 acima de 25% f_{cm} (caso 4 – OL ₁₁).	203
Figura 5.83 – Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 3 (OL ₁₁) ao usar as equações 5.17 e 5.15 quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} e maiores que 25% f_{cm} , respectivamente.	204
Figura 5.84 – Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 4 (OL ₁₁) ao usar as equações 5.18 e 5.16 quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} e maiores que 25% f_{cm} , respectivamente.	204
Figura 5.85- Gráficos para as ondas OL _{11ind} : (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 12 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.	206
Figura 5.86-Desvio em porcentagem em função da tensão estimada no prisma para as ondas OL _{11ind}	207

Figura 5.87 – Curvas da variação relativa da velocidade em função da tensão obtidas pelos métodos de transmissão direta e indireta para os prismas do concreto (a) C1 e (b) C2.	208
Figura 5.88 - Curvas da variação relativa da velocidade em função da tensão obtidas pelos métodos de transmissão direta e indireta para os prismas do concreto (a) C3 e (b) C5.	209
Figura 5.89 - Curvas da variação relativa da velocidade em função da tensão obtidas pelos métodos de transmissão direta e indireta para os prismas do concreto (a) C6 e (b) C7.	209
Figura 5.90 –Face lateral onde os transdutores foram posicionados pelo arranjo de transmissão indireta: (a) Distribuição das tensões normais e (b) Tensões normais verticais de compressão ao longo da linha vermelha quando a carga máxima (300 kN) foi aplicada no prisma C1P1.....	211
Figura 5.91 - Face central: (a) Distribuição das tensões normais e (b) Tensões normais verticais de compressão ao longo da linha vermelha quando a carga máxima (300 kN) foi aplicada no prisma C1P1.....	211
Figura 5.92 – Curvas de $\Delta V/V_0$ em função da tensão para os prismas do concreto C1 obtidas experimentalmente pelos métodos direto e indireto e curvas de $\Delta V/V_0$ para o método indireto obtidas ao multiplicar por 1.06 os valores de $\Delta V/V_0$ da curva experimental do método direto.	212
Figura 5.93 – Razão entre a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto e a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método direto em função do carregamento aplicado nos prismas.	213
Figura 5.94 – Velocidade das ondas ultrassônicas ao se propagarem nos prismas sem tensão pelo método de transmissão direta e indireta.	214
Figura 5.95– Razão entre a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto e a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método direto em função da tensão para os prismas do concreto (a) C1 e (b) C2.....	215
Figura 5.96- Razão entre a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto e a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método direto em função da tensão para os prismas do concreto (a) C3 e (b) C5.....	215
Figura 5.97– Razão entre a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto e a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método direto em função da tensão para os prismas do concreto (a) C6 e (b) C7.....	216
Figura 5.98– Curvas da variação relativa de velocidade em função da tensão usando o método de transmissão indireta com distâncias entre transdutores de 15 cm, 25 cm e 42.8 cm para os concretos (a) C1 e (b) C2.	220
Figura 5.99– Curvas da variação relativa de velocidade em função da tensão usando o método de transmissão indireta com distâncias entre transdutores de 15 cm, 25 cm e 42.8 cm para os concretos (a) C3 e (b) C5.	220

Figura 5.100– Curvas da variação relativa de velocidade em função da tensão usando o método de transmissão indireta com distâncias entre transdutores de 15 cm, 25 cm e 42.8 cm para os concretos (a) C6 e (b) C7.....	221
Figura 5.101– Velocidades das ondas ultrassônicas nos prismas sem tensão ao serem emitidas pelo método de transmissão indireta com distância entre os transdutores de 15 cm, 25 cm e 42.8cm.	222
Figura 5.102 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem de tensão real aplicada ao usar (a) equação 5.19 (caso 1-OL _{11ind}) e (b) equação 5.20 (caso 2-OL _{11ind}).	224
Figura 5.103 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem de tensão real aplicada para o caso 2 ao usar a equação 5.20, obtida com os dados experimentais de todo o carregamento (pontos em rosa) e a nova equação, obtida com os dados experimentais a partir da tensão aplicada de 20% f _{cm} (pontos em preto).....	226
Figura 5.104 – Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem de tensão real aplicada ao usar (a) Caso 1 (OL _{11ind}): equação 5.19 (pontos em rosa), equação 5.21 (pontos em azul) e a equação 5.23 (pontos em preto) e (b) Caso 2 (OL _{11ind}): equação 5.22 (pontos em azul) e equação 5.20 (pontos em rosa).	226
Figura 5.105 – Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem de tensão real aplicada ao usar apenas as equações adotadas para (a) Caso 1 (OL _{11ind}): equação 5.21 (pontos em azul) e a equação 5.23 (pontos em preto) e (b) Caso 2 (OL _{11ind}): equação 5.22 (pontos em azul) e equação 5.20 (pontos em rosa).	227
Figura 5.106 – Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 1 (OL _{11ind}) ao usar as equações 5.21 e 5.23 quando as tensões reais aplicadas foram de até 20% f _{cm} e maiores que 20% f _{cm} , respectivamente.....	228
Figura 5.107 – Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 2 (OL _{11ind}) ao usar as equações 5.22 e 5.20 quando as tensões reais aplicadas foram de até 20% f _{cm} e maiores que 20% f _{cm} , respectivamente.....	228
Figura 5.108 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem de tensão real aplicada ao usar (a) equação 5.24 (caso 3-OL _{11ind}) e (b) equação 5.25 (caso 4-OL _{11ind}).	230
Figura 5.109 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem de tensão real aplicada para o caso 4 usando a equação 5.25, obtida com os dados experimentais de todo o carregamento (pontos em rosa), e uma nova equação, obtida com os dados experimentais a partir da tensão aplicada de 20% f _{cm} (pontos em preto).....	231
Figura 5.110 – Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar (a) Caso 3 (OL _{11ind}): equação 5.24 (pontos em rosa), equação 5.26 (pontos em azul) e a equação 5.28 (pontos em preto) e (b) Caso 4 (OL _{11ind}): equação 5.27 (pontos em azul) e equação 5.25 (pontos em rosa).	232
Figura 5.111 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar apenas as equações adotadas para (a) Caso 3 (OL _{11ind}): equação 5.26	

(pontos em azul) e a equação 5.28 (pontos em preto) e (b) Caso 4 (OL_{11ind}): equação 5.27 (pontos em azul) e equação 5.25 (pontos em rosa).....	232
Figura 5.112 – Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 3 (OL_{11ind}) ao usar as equações 5.26 e 5.28 quando as tensões reais aplicadas foram de até $20\%f_{cm}$ e maiores que $20\%f_{cm}$, respectivamente.	233
Figura 5.113 – Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 4 (OL_{11ind}) ao usar as equações 5.27 e 5.25 quando as tensões reais aplicadas foram de até $20\%f_{cm}$ e maiores que $20\%f_{cm}$, respectivamente.	234
Figura A. 1– Elemento linear prismático C3D8R com 8 nós.....	246
Figura A.2- Distribuição das tensões normais verticais no prisma.	247
Figura A.3- Face 1: (a) Distribuição das tensões normais na face 1 e (b) Tensões normais verticais de compressão ao longo da linha vermelha quando a carga máxima foi aplicada no prisma C1P1.....	247
Figura A.4- Face 2: (a) Distribuição das tensões normais na face 2 e (b) Tensões normais verticais de compressão ao longo da linha vermelha quando a carga máxima foi aplicada no prisma C1P1.....	248
Figura A.5- Face 3: (a) Distribuição das tensões normais na face 3 e (b) Tensões normais verticais de compressão ao longo da linha vermelha quando a carga máxima foi aplicada no prisma C1P1.....	248
Figura B. 1-Variação relativa da velocidade das ondas OL_{11} em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 1 e (b) 2.	249
Figura B. 2 - Variação relativa da velocidade das ondas OL_{11} em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 3 e (b) 4.....	249
Figura B. 3 - Variação relativa da velocidade das ondas OL_{11} em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 5 e (b) 6.....	249
Figura B. 4 - Variação relativa da velocidade das ondas OL_{11} em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 7 e (b) 8.....	250

Figura B. 5 - Variação relativa da velocidade das ondas OL ₁₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 9 e (b) 10.	250
Figura B. 6 - Variação relativa da velocidade das ondas OL ₁₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 11 e (b) 12.	250
Figura B. 7 - Variação relativa da velocidade das ondas OL ₁₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante o ensaio 13.	251
Figura B. 8 - Variação relativa da velocidade das ondas OC ₁₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 1 e (b) 2.	251
Figura B. 9 - Variação relativa da velocidade das ondas OC ₁₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 3 e (b) 4.	251
Figura B. 10 - Variação relativa da velocidade das ondas OC ₁₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 5 e (b) 6.	252
Figura B. 11 - Variação relativa da velocidade das ondas OC ₁₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 7 e (b) 8.	252
Figura B. 12 - Variação relativa da velocidade das ondas OC ₁₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 9 e (b) 10.	252
Figura B. 13 - Variação relativa da velocidade das ondas OC ₁₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 11 e (b) 12.	253
Figura B. 14 - Variação relativa da velocidade das ondas OC ₁₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante o ensaio 13.	253
Figura B. 15 - Variação relativa da velocidade das ondas OL ₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 1 e (b) 2.	253

Figura B. 16 - Variação relativa da velocidade das ondas OL ₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 3 e (b) 4.....	254
Figura B. 17 - Variação relativa da velocidade das ondas OL ₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 5 e (b) 6.....	254
Figura B. 18 - Variação relativa da velocidade das ondas OL ₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 7 e (b) 8.....	254
Figura B. 19 - Variação relativa da velocidade das ondas OL ₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 9 e (b) 10.....	255
Figura B. 20 - Variação relativa da velocidade das ondas OL ₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 11 e (b) 12.....	255
Figura B. 21 - Variação relativa da velocidade das ondas OL ₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante o ensaio 13.	255
Figura B. 22 - Variação relativa da velocidade das ondas OC ₂₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 1 e (b) 2.....	256
Figura B. 23 - Variação relativa da velocidade das ondas OC ₂₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 3 e (b) 4.....	256
Figura B. 24 - Variação relativa da velocidade das ondas OC ₂₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 5 e (b) 6.....	256
Figura B. 25 - Variação relativa da velocidade das ondas OC ₂₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 7 e (b) 8.....	257
Figura B. 26 - Variação relativa da velocidade das ondas OC ₂₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase	

de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 9 e (b) 10. 257

Figura B. 27 - Variação relativa da velocidade das ondas OC_{21} em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 11 e (b) 12. 257

Figura B. 28 - Variação relativa da velocidade das ondas OC_{21} em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante o ensaio 13. 258

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Impedância acústica de alguns materiais.....	43
Tabela 2.2- Velocidade das ondas longitudinais.	45
Tabela 2.3- Velocidade das ondas de cisalhamento.	45
Tabela 2.4 - Qualidade do concreto com base na velocidade das ondas ultrassônicas.	45
Tabela 2.5- Efeito da temperatura na velocidade das ondas ultrassônicas.....	55
Tabela 3.1: Coeficientes do tensor acústico, G_{ij}	86
Tabela 4.1 - Composição granulométrica da areia fina.	95
Tabela 4.2 - Composição granulométrica da areia média.	95
Tabela 4.3 - Composição granulométrica da brita 1.....	95
Tabela 4.4 - Traço e aditivos para cada tipo de concreto utilizado na concretagem dos 31 prismas.....	96
Tabela 4.5 – Valores do incremento de força, da força e da tensão máximas aplicadas e porcentagem de tensão máxima aplicada em relação ao f_{ck} e ao f_{cm}	108
Tabela 4.6 - Valores do incremento de força, da força e da tensão máximas aplicadas e porcentagem de tensão máxima aplicada em relação ao f_{ck} e ao f_{cm}	112
Tabela 4.7 – Prismas ensaiados em cada estudo e os métodos de transmissão das ondas usados nos ensaios.	116
Tabela 5.1– Propriedades mecânicas e elásticas dos 31 prismas de concreto.....	120
Tabela A.1–Propriedades elásticas do concreto e do aço.....	246

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	33
1.1 Considerações Iniciais.....	33
1.2 Objetivos.....	36
1.3 Justificativa	36
1.4 Metodologia.....	37
1.5 Apresentação dos capítulos.....	39
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	41
2.1 Teoria da propagação das ondas.....	41
2.1.1 Tipos de ondas ultrassônicas.....	43
2.2 Ensaio ultrassônico.....	46
2.2.1 Equipamentos utilizados no ensaio ultrassônico.....	47
2.2.2 Geração das ondas ultrassônicas	48
2.2.3 Obtenção do tempo de propagação das ondas	49
2.3 Fatores que afetam a velocidade das ondas ultrassônicas no concreto	53
2.3.1 Vazios	53
2.3.2 Dimensão, quantidade e tipo do agregado graúdo	53
2.3.3 Relação água / cimento	54
2.3.4 Idade do concreto	54
2.3.5 Umidade do concreto	54
2.3.6 Temperatura do concreto	55
2.3.7 Presença de armaduras	55
2.3.8 Contato do transdutor.....	56
2.3.9 Nível de tensão.....	56
2.4 Acustoelasticidade	57
2.4.1 Velocidade das ondas ultrassônicas em meio sólido, elástico, homogêneo e isotrópico sem tensão	57

2.4.2	Velocidade das ondas ultrassônicas em meio sólido, elástico, homogêneo e isotrópico sob tensão.....	60
3.	DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO E DISCUSSÕES	70
3.1	Variação do tensor constitutivo em função das hipóteses adotadas por Hughes e Kelly (1953)	70
3.1.1	Caso 1: Tensor constitutivo de um material isotrópico sob tensão adotando as Hipóteses A e B de Hugues e Kelly.....	70
3.1.2	Caso 2: Tensor constitutivo de um material isotrópico sob tensão adotando apenas a Hipótese B de Hugues e Kelly	75
3.1.3	Caso 3: Tensor constitutivo de um material isotrópico sob tensão adotando apenas a Hipótese A de Hugues e Kelly	78
3.1.4	Resumo	82
3.2	Proposta de uma formulação para o tensor constitutivo em função da tensão aplicada sem depender das constantes l, m e n	82
3.2.1	Propagação das ondas ultrassônicas em meio elástico, homogêneo, anisotrópico (sem simetria do tensor C_{ijkl}) e sem tensão	83
3.2.2	Equacionamento que relaciona o tensor constitutivo C_{ijkl} com a tensão aplicada no material	90
3.2.3	Determinação dos elementos da diagonal do tensor constitutivo C_{ijkl} em função do estado de tensão do material	93
3.2.4	Resumo.....	94
4.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	95
4.1	Equipamento e materiais utilizados	95
4.2	Ensaio usando o método de transmissão direta (Dir)	101
4.2.1	Estudo do efeito da aplicação de ciclos de carregamento e descarregamento no efeito acustoelástico usando o método da transmissão direta.....	104
4.2.2	Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços pelo método de transmissão direta.....	106
4.3	Ensaio usando os métodos de transmissão direta e indireta (Dir+Ind).....	109
4.4	Ensaio usando o método da transmissão indireta (Ind).....	113
4.5	Resumo dos ensaios.....	115
4.6	Processamento de sinais	116

5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	119
5.1	Propriedades mecânicas e elásticas dos prismas de concreto.....	119
5.2	Estudo do efeito da aplicação de ciclos de carregamento e descarregamento no efeito acustoelástico usando o método de transmissão direta	120
5.2.1	Prisma C4P1 – Análises para a fase de carregamento	121
5.2.2	Prisma C4P1– Análises para a fase de descarregamento.....	142
5.2.3	Prisma C2P1 – Análises para a fase de carregamento	155
5.2.4	Prisma C2P1 – Análises para a fase de descarregamento.....	167
5.2.5	Resumo do estudo dos ciclos na fase de carregamento para os dois prismas estudados	173
5.2.6	Resumo do estudo dos ciclos na fase de descarregamento para os dois prismas estudados	174
5.3	Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços pelo método de transmissão direta	176
5.3.1	Efeito acustoelástico em prismas de diferentes traços de concreto	176
5.3.2	Determinação de uma equação empírica para obter a tensão a partir de C^σ , f_{cm} ou E_{din} 183	
5.3.3	Determinação de uma equação empírica para obter a tensão a partir de $\Delta V/V_0$, f_{cm} ou E_{din}	197
5.4	Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços usando o método de transmissão indireta.....	205
5.4.1	Análise dos ensaios realizados usando os métodos de transmissão direta e indireta (Dir+Ind)	205
5.4.2	Análise dos ensaios realizados usando apenas o método de transmissão indireta (Ind) 219	
5.4.3	Determinação de uma equação empírica para obter a tensão a partir de C^σ , f_{cm} ou E_{din} usando o método de transmissão indireta	223
5.4.4	Determinação de uma equação empírica para obter a tensão a partir de $\Delta V/V_0$, f_{cm} ou E_{din} usando o método de transmissão indireta	229
6.	CONCLUSÃO.....	235
6.1	Considerações finais.....	235

6.2 Propostas para trabalhos futuros.....	238
REFERÊNCIAS.....	240
APÊNDICE.....	246
Apêndice A - Simulação numérica	246
Apêndice B.....	249

1. INTRODUÇÃO

Serão apresentadas as considerações iniciais a respeito do trabalho desenvolvido, os objetivos principal e secundários deste trabalho, as justificativas para a sua realização e também a metodologia da pesquisa, que foi dividida em dois grupos: o desenvolvimento analítico e o programa experimental.

1.1 Considerações Iniciais

O concreto possui papel fundamental na indústria da construção, já que as vantagens do uso deste material fizeram dele o mais utilizado neste setor. Ele está presente em inúmeras obras de engenharia, como edifícios, pontes, barragens, aeroportos, estradas, entre outras. Estas estruturas são projetadas e construídas de maneira a garantir 3 requisitos de qualidade: capacidade resistente, bom desempenho em serviço e durabilidade. No entanto, tais estruturas passam por um processo natural de deterioração ao longo do tempo gerado pelo ambiente em que estão condicionadas. Além disto, a ausência de manutenção, possíveis erros de projeto, de execução da obra, ou o uso inadequado das construções também contribuem com a degradação dos elementos estruturais. Neste contexto, a fim de garantir os três requisitos de qualidade citados anteriormente, é necessária a realização de avaliações periódicas nas estruturas de concreto. Os ensaios não destrutivos (ENDs) são ferramentas interessantes para tal função, uma vez que, eles podem ser reaplicados inúmeras vezes num mesmo local dos elementos sem comprometer a integridade estrutural dos mesmos. Deste modo, os ENDs possibilitam realizar o monitoramento das condições internas da estrutura ao longo do tempo e, conseqüentemente, identificar os danos ainda no estágio inicial. Como resultados, além da garantia dos 3 requisitos de qualidade, tem-se a redução de custos com reparos ou manutenção corretiva. Em estruturas nas quais não são realizadas avaliações periódicas e manutenções preventivas, podem ser encontradas patologias em diversos graus de intensidade. Nestes casos, os ensaios não destrutivos também possuem um papel importante, pois, auxiliam no diagnóstico das causas dos danos e no controle de qualidade dos reparos necessários. Além disto, os ENDs contribuem na investigação de danos em estruturas que passaram por acidentes, como impactos, incêndios, explosões, entre outras (ACI 228. 2R-98, 1998; MALHOTRA; CARINO, 2004; METHA; MONTEIRO, 2008; SHOKOUHI; ZOEGA; WIGGENHAUSER, 2010 ABNT NBR 6118, 2014, NARAYANAN; KOCHERLA; SUBRAMANIAM, 2020).

Um tipo de ensaio não destrutivo bastante utilizado nos elementos de concreto é o ultrassônico. O ensaio consiste na emissão de ondas mecânicas com frequência acima de 20 kHz, denominadas ultrassônicas, através do elemento que se deseja avaliar. A velocidade destas ondas é influenciada por defeitos que possam existir no caminho de propagação das mesmas, como fissuras e falhas de concretagem. Com isto, é possível localizar e estimar a dimensão de danos no interior dos elementos. Este tipo de ensaio também possibilita avaliar propriedades mecânicas do material, como sua resistência à compressão e as constantes elásticas dinâmicas. O método de ensaio com o ultrassom vem sendo bastante utilizado em estruturas de concreto a fim de investigar danos, avaliar a homogeneidade dos elementos e as suas propriedades mecânicas (MALHOTRA; CARINO, 2004; CHAI et al., 2010; HAACH; JULIANI; RAVANINI, 2015; HAACH; RAMIREZ, 2016; ZHANG et al., 2017). Outra aplicação para o ultrassom surgiu em 1953, com Hughes e Kelly, por meio do desenvolvimento da teoria da acustoelasticidade. De acordo com esta teoria, as velocidades das ondas ultrassônicas estão relacionadas com o estado de tensão existente no meio no qual elas se propagam. Hughes e Kelly (1953) elaboraram a teoria com base na formulação de Murnaghan (1951) para deformações finitas e consideraram termos de terceira ordem na equação da energia de deformação específica do material. O resultado foi a determinação de equações nas quais as velocidades das ondas ultrassônicas são dependentes do estado de tensão do material. Ou seja, com a acustoelasticidade surgiu a possibilidade de se avaliar o nível de tensão existente num material por meio da emissão de ondas ultrassônicas. A influência do estado de tensão do material na velocidade das ondas é denominada “efeito acustoelástico”.

O uso do ultrassom na avaliação de tensões em estruturas de concreto abriria um leque de novas possibilidades de aplicação para este ensaio. Entre elas: a investigação do nível de protensão em cabos de aço presentes em estruturas protendidas, como vigas, lajes e tirantes utilizados para fazer a contenção de solos; a avaliação de tensões em alvenarias que passaram a receber carregamentos após a deformação excessiva de vigas; a análise da distribuição de tensões entre paredes de alvenaria estrutural; a obtenção da redistribuição de tensões em vigas e pilares após a ocorrência de recalques diferenciais; a avaliação das tensões em elementos estruturais que passaram por acidentes como, impactos, explosões, incêndios, tremores de terra ou outro tipo de acontecimento que possa levar a perda de algum elemento estrutural ou de sua integridade; a avaliação de tensões em estruturas subdimensionadas e com necessidade de um reforço estrutural, entre outras situações em que os níveis de tensão nos elementos podem estar altos, acima do previsto em projeto; o monitoramento do nível de tensões nas estruturas ao longo do tempo; entre outras aplicações. Portanto, com a acustoelasticidade, o ensaio

ultrassônico tem o potencial de se tornar uma ferramenta ainda mais poderosa na avaliação de estruturas. Assim, o uso do ultrassom na análise de tensões, juntamente com as demais aplicações deste e de outros métodos de ensaio, resultaria em uma avaliação ainda mais completa e eficaz dos elementos estruturais. No entanto, a avaliação de tensões em estruturas de concreto *in situ* por meio da propagação das ondas ultrassônicas ainda não é realizada. Estudos sobre o ultrassom com esta finalidade no concreto vem sendo realizados (SPALVIER et al., 2017; BOMPAN; HAACH, 2018; RESENDE, 2018; NOGUEIRA; RENS, 2019). No entanto, é necessária uma quantidade maior de estudos a fim de se conhecer muito bem o fenômeno neste material e, com isto, poder contribuir com o desenvolvimento de procedimentos de ensaios confiáveis tanto para o estudo da acustoelasticidade em laboratório quanto para a avaliação de tensões em estruturas *in situ* futuramente.

O ensaio com o ultrassom geralmente é realizado com os transdutores posicionados em faces opostas do elemento, que consiste no arranjo de transmissão direta (PAYAN et al., 2009; LILLAMAND et al., 2010; ZHANG et al., 2012; BOMPAN; HAACH, 2018; RESENDE, 2018). Um outro tipo de arranjo é o de transmissão indireta, que é obtido ao posicionar os transdutores na mesma face do elemento. Visando a aplicação do ensaio em estruturas *in situ*, a investigação do efeito acustoelástico precisa ser realizada também pelo método de transmissão indireta. Afinal, nas estruturas *in situ*, nem sempre será possível ter acesso à duas faces opostas do elemento estrutural a fim de realizar a emissão das ondas pelo método direto. Além disso, as ondas ultrassônicas longitudinais emitidas na mesma direção da tensão aplicada no material são um dos tipos de ondas mais favoráveis para a avaliação da tensão, pois, apresentam o maior efeito acustoelástico (LILLAMAND et al., 2010; BOMPAN; HAACH, 2018). No entanto, em elementos estruturais *in situ*, como os pilares, só é possível emitir este tipo de onda usando o arranjo indireto dos transdutores, pois, não se tem acesso às faces de extremidade dos elementos para emití-las pelo arranjo direto. Portanto, é necessário o desenvolvimento de pesquisas que continuem a explorar a acustoelasticidade no concreto e não apenas pelo método de transmissão direta das ondas, mas também pelo método de transmissão indireta. No entanto, o estudo da acustoelasticidade em elementos de concreto usando o método de transmissão indireta é muito pouco explorado, como será visto na revisão bibliográfica apresentada no subitem 2.4.

1.2 Objetivos

O objetivo principal da pesquisa foi investigar o efeito acustoelástico em elementos de concreto simples usando a propagação das ondas ultrassônicas pelos métodos de transmissão direta e indireta.

Os objetivos específicos foram:

- Estudar a formulação da teoria da acustoelasticidade e o tensor constitutivo do material fornecido por ela.
- Desenvolver formulações para o tensor constitutivo adotando apenas uma das hipóteses de Hugues e Kelly (1953) para a equação de energia específica do material, ou seja: a consideração dos termos de terceira ordem nesta equação ou a consideração do tensor de deformação de Green como medida de deformação.
- Propor uma formulação que relaciona o tensor constitutivo do material com a tensão sem depender das constantes de Murnaghan, l , m e n .
- Realizar um estudo sobre o efeito da aplicação de ciclos de carregamento e descarregamento no efeito acustoelástico de elementos de concreto.
- Estudar o efeito acustoelástico em elementos de concreto de diferentes traços.

1.3 Justificativa

A avaliação das estruturas de concreto é fundamental para garantir a segurança e conforto dos usuários, além da durabilidade das mesmas. A determinação do estado de tensão dos elementos estruturais por meio da propagação de ondas ultrassônicas representaria um importante avanço no do que diz respeito à avaliação de estruturas, pois, a tornaria mais completa e confiável. O conhecimento do estado de tensão dos materiais por meio do ultrassom possibilitaria investigar estruturas que passaram por situações com risco de comprometimento da integridade estrutural dos seus elementos, como: explosões, impactos, incêndios, desastres naturais, entre outras. Também permitiria investigar a redistribuição de tensões que ocorre em elementos por conta de recalques diferenciais dos apoios e a distribuição de tensões em paredes de alvenaria estrutural. Além disto, poderia ser realizado o monitoramento das tensões em obras que representam grande risco à população e ao meio ambiente em decorrência de sua ruptura, como as barragens.

Para conseguir avançar em direção à avaliação de tensões em estruturas de concreto é necessário conhecer muito bem o comportamento acustoelástico deste material. Este conhecimento permite aprimorar procedimentos de ensaios para o estudo deste fenômeno e auxilia no desenvolvimento de procedimentos para a aplicação do ultrassom nas análises de tensões em estruturas *in situ*. É importante realizar estes estudos abordando também o método de transmissão indireta das ondas ultrassônicas, já que, na prática, a emissão pelo método direto nem sempre será possível de ser realizada. Apesar de serem realizados estudos sobre a acustoelasticidade no concreto (PAYAN et al., 2009; SPALVIER et al., 2017; RESENDE, 2018; BOMPAN; HAACH, 2018; NOGUEIRA; RENS, 2019), existem muitas questões ainda que precisam ser exploradas neste campo. O uso do método indireto é uma delas, pois, faltam trabalhos em concreto abordando este assunto. Portanto, investigar o comportamento acustoelástico do concreto por meio dos métodos de transmissão direta e indireta irá promover um avanço no conhecimento do fenômeno neste material e contribuir para que futuramente a avaliação de tensões em estruturas de concreto possa ser realizada utilizando o ensaio ultrassônico.

1.4 Metodologia

A metodologia da pesquisa foi dividida em 2 grupos:

- Desenvolvimento Analítico:

A teoria da acustoelasticidade foi estudada e expressões analíticas foram desenvolvidas para o tensor constitutivo do material com tensão considerando apenas uma das hipóteses adotadas por Hugues e Kelly (1953) no desenvolvimento desta teoria. Também foi proposta uma formulação a fim de relacionar o tensor constitutivo com a tensão no material sem depender das constantes de Murnaghan, l , m e n .

- Programa Experimental

Os ensaios foram realizados usando os arranjos de transmissão direta e indireta para a emissão de ondas ultrassônicas em prismas de concreto. Estes prismas foram submetidos à ensaios de compressão uniaxial e os ensaios ultrassônicos foram realizados durante as fases de carregamento e de descarregamento. A cada incremento aplicado no carregamento ou retirado no descarregamento, a força resultante aplicada era mantida constante enquanto as ondas ultrassônicas eram emitidas nos prismas. Os ensaios foram divididos em 3 grupos:

a) Ensaio usando o método da transmissão direta (Dir)

A partir destes ensaios, foi realizado o “Estudo do efeito da aplicação de ciclos de carregamento e descarregamento no efeito acustoelástico usando o método da transmissão direta” a fim de conhecer e compreender o comportamento acustoelástico do concreto ao longo da aplicação dos ciclos, como a ocorrência da estabilização das curvas acustoelásticas e a sua causa. Com este estudo, espera-se conhecer qual é o ciclo adequado para a realização do ensaio ultrassônico visando o estudo da acustoelasticidade no concreto e, com isto, contribuir para o desenvolvimento de um procedimento de ensaio confiável para estudar este fenômeno no concreto. Sabendo que diferentes tipos de concretos podem ser empregados para a construção de obras na engenharia civil, também foi feito o “Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços pelo método de transmissão direta”. O objetivo foi avaliar a influência de concretos com diferentes composições no efeito acustoelástico e, com isto, contribuir para avançar com o conhecimento necessário para a aplicação do ultrassom na avaliação de tensões em estruturas *in situ*.

b) Ensaio usando os métodos de transmissão direta e indireta (Dir+Ind)

Com estes ensaios foi realizado o “Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços usando o método da transmissão indireta”, no qual, a influência de concretos de diferentes composições sobre o efeito acustoelástico também foi avaliada usando a transmissão indireta das ondas ultrassônicas. Neste estudo, foi realizada também uma comparação entre o efeito acustoelástico oriundo de ambos os métodos de transmissão, direta e indireta, a fim de aumentar o conhecimento sobre o fenômeno no concreto. Com este estudo, espera-se contribuir para avançar no conhecimento necessário para a avaliação de tensões com o ultrassom em estruturas *in situ*, nas quais, o arranjo indireto dos transdutores pode ser a única alternativa para a emissão das ondas através das mesmas.

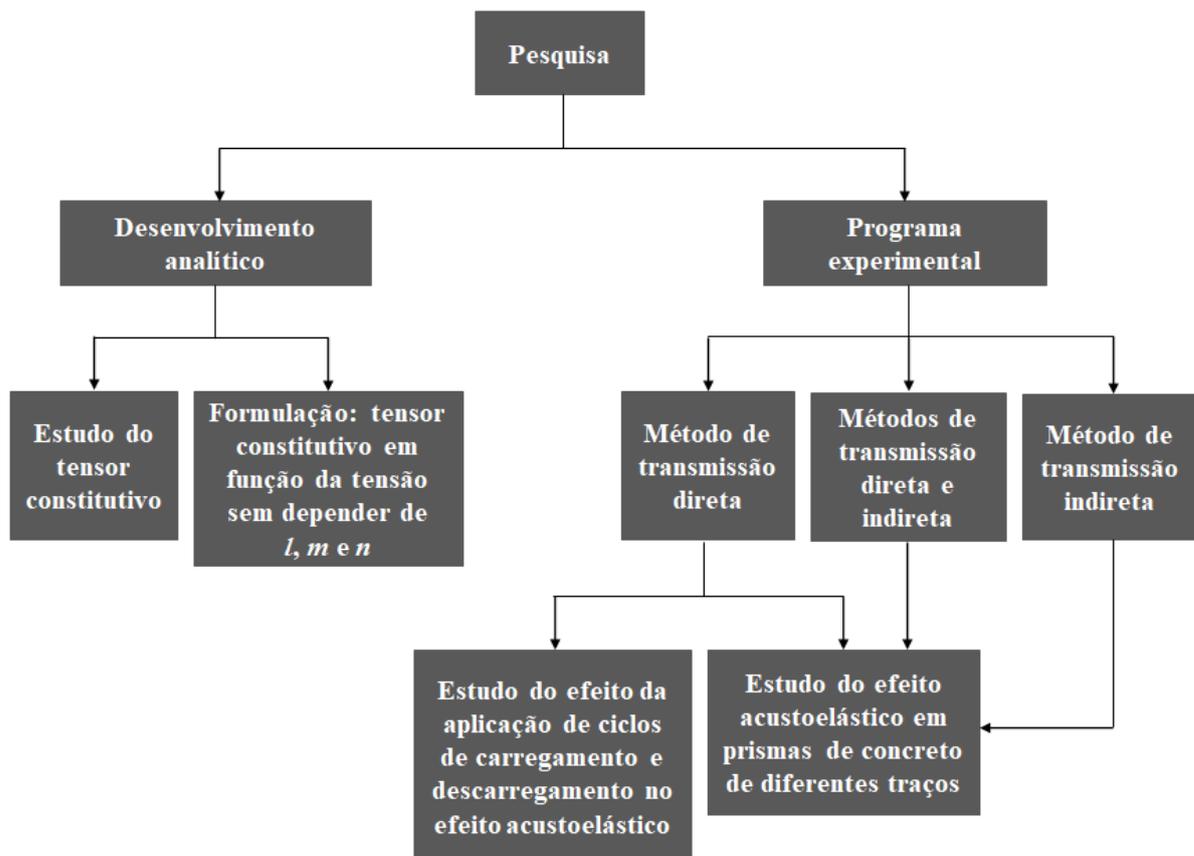
c) Ensaio usando o método da transmissão indireta (Ind)

O estudo realizado a partir destes ensaios foi o mesmo apresentado em b), ou seja, “Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços usando o método da transmissão indireta”. No ensaio com o ultrassom, o posicionamento pelo arranjo indireto dos transdutores emissor e receptor na superfície do elemento pode ser feito utilizando diferentes distâncias entre eles, o que resulta em diferentes distâncias e regiões de percurso das ondas ultrassônicas. Assim, os ensaios usando apenas o método de transmissão indireta foram empregados a fim de investigar a influência das diferentes distâncias de percurso das ondas no

efeito acustoelástico de elementos de concreto. Deste modo, espera-se contribuir para aumentar o conhecimento sobre o fenômeno da acustoelasticidade no concreto e auxiliar na elaboração de procedimentos de ensaios confiáveis para o estudo do fenômeno.

A figura 1.1 apresenta o fluxograma da pesquisa.

Figura 1.1 – Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autor.

1.5 Apresentação dos capítulos

O trabalho está dividido em 6 capítulos: introdução, revisão bibliográfica, desenvolvimento analítico e discussões, programa experimental, resultados e discussões do programa experimental e conclusão.

O capítulo 2 apresenta conceitos sobre: a teoria de propagação das ondas, o método de ensaio com o ultrassom, processamento de sinais, fatores que afetam a velocidade das ondas

ultrassônicas no concreto e a teoria da acustoelasticidade. Por fim, foi apresentado o estado da arte com pesquisas relacionadas à acustoelasticidade no concreto e em outros materiais.

O capítulo 3 apresenta um estudo sobre o tensor constitutivo oriundo da teoria da acustoelasticidade, um estudo sobre este tensor ao considerar as diferentes hipóteses de não linearidade adotadas por Hugues e Kelly (1953) e também formulações analíticas propostas.

O capítulo 4 descreve os materiais e equipamentos utilizados no programa experimental e os procedimentos adotados para a realização dos ensaios.

O capítulo 5 mostra os resultados dos ensaios do programa experimental e as discussões desenvolvidas.

O capítulo 6 expõe as considerações finais a respeito dos estudos realizados e propostas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas revisões sobre tópicos importantes para o desenvolvimento do trabalho e também o estado da arte com pesquisas referentes à acustoelasticidade no concreto e em outros materiais.

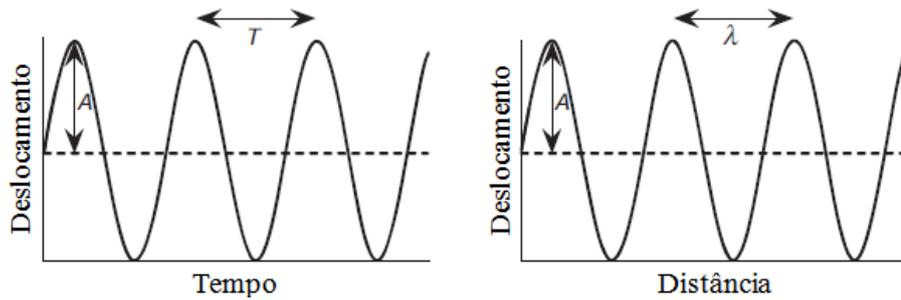
2.1 Teoria da propagação das ondas

As ondas mecânicas são classificadas de acordo com as suas frequências. A unidade da frequência (f) é Hertz, que significa “ciclos por segundo”. Então, a frequência é uma grandeza que indica o número de ciclos de onda que passa por um determinado ponto por segundo. As ondas são classificadas como “som” quando suas frequências estão entre 20 Hz e 20 kHz, que corresponde à faixa de frequência que o ser humano é capaz de ouvir. Ondas com frequência abaixo de 20 Hz e acima de 20 kHz são classificadas como infrassom e ultrassom, respectivamente (ANDREUCCI, 2016).

Um ciclo completo de onda é a uma oscilação da onda correspondente ao comprimento da onda (λ), que é a distância entre duas cristas sucessivas ou entre dois vales sucessivos. O tempo para ocorrer um ciclo completo de onda, ou seja, para que duas cristas sucessivas passem por um determinado ponto, é denominado período (T). A frequência é o inverso do período (equação 2.1). A onda também possui um deslocamento máximo denominado de amplitude (A). A figura 2.1 ilustra λ , T e A . A frequência e o comprimento de onda estão relacionados com a velocidade de propagação da onda (V) pela equação 2.2. Conforme esta equação, para um mesmo meio, ondas com menores frequências possuem maiores comprimentos de onda e vice-versa (JOSEF KRAUTKRANER; HEBERT KRAUTKRANER, 1990; METHA; MONTEIRO, 2008).

$$f = \frac{1}{T} \tag{2.1}$$

Figura 2.1 - Parâmetros das ondas.



Fonte: Metha e Monteiro (2008).

$$V = f\lambda \quad (2.2)$$

Quando, ao se propagar num meio, um pulso de ondas colide com a interface de materiais de propriedades distintas, parte da energia das ondas sofre dispersão para fora do caminho original do pulso. Isto ocorre, por exemplo, quando o pulso de ondas ao se propagar no concreto colide com vazios, fissuras e os agregados graúdos. A magnitude da dispersão é intensa quando o comprimento de onda é menor ou do mesmo tamanho do agente dispersor, o que resulta em rápida atenuação das ondas. No caso do concreto, quando as frequências das ondas são de 500 kHz, os comprimentos de onda correspondentes são de aproximadamente 10 mm. Conseqüentemente, a distância que as ondas percorrem, antes que elas sejam completamente atenuadas, é de apenas alguns centímetros. Para que as ondas possam percorrer maiores distâncias é necessário usar frequências menores e, portanto, comprimentos de onda maiores. Por exemplo, ondas com 20 kHz podem percorrer até 10 m de concreto (MALHOTRA; CARINO, 2004).

A razão para que parte das ondas ultrassônicas sofra dispersão ao colidir com a interface de materiais distintos é a diferença entre as impedâncias acústicas destes materiais. A impedância acústica (Z) é uma característica medida pelo produto entre a densidade do material (ρ) e a velocidade da onda neste material (V), conforme equação 2.3. A porcentagem da energia total da onda que é refletida e transmitida através da interface entre dois meios distintos pode ser calculada com base nas impedâncias acústicas dos meios conforme equações 2.4 e 2.5. Na interface do aço com a água, por exemplo, apenas 12% da energia é transmitida e, portanto, 88% é refletida. A tabela 2.1 mostra a impedância acústica de alguns materiais quando o tipo de onda ultrassônica que se propaga por eles é a longitudinal. Os diferentes tipos de ondas ultrassônicas serão explicados mais adiante (ANDREUCCI, 2016).

$$Z = \rho V \quad (2.3)$$

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.4)$$

$$T = 1 - R \quad (2.5)$$

Nas equações 2.4 e 2.5:

R e T são as porcentagens de energia refletida e transmitida, respectivamente.

Z_1 e Z_2 são as impedâncias acústicas dos dois meios 1 e 2, que formam a interface.

Tabela 2.1- Impedância acústica de alguns materiais.

Material	Impedância acústica g/cm².s
Ar	0,00043.10 ⁵
Água	1,48.10 ⁵
Aço	46,0.10 ⁵
Alumínio	17,1.10 ⁵
Cobre	41,6.10 ⁵
Magnésio	10,0.10 ⁵
Vidro	14,2.10 ⁵
Borracha	2,0.10 ⁵
Acrílico	3,1.10 ⁵

Fonte: Adaptado de Andreucci (2016).

O concreto e o ar, contido nas fissuras, possuem impedâncias acústicas muito diferentes, já que a densidade do concreto e a velocidade das ondas neste material são muito maiores do que a densidade do ar e a velocidade das ondas neste meio. Assim, uma quantidade desprezível da energia das ondas é transmitida através da interface entre o concreto e o ar.

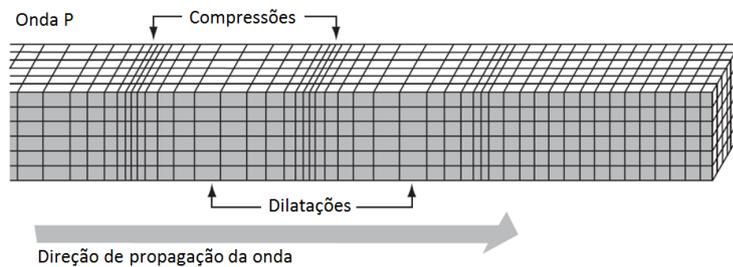
2.1.1 Tipos de ondas ultrassônicas

As ondas sonoras são ondas mecânicas, pois precisam de um meio material para se propagar. Quando uma tensão é repentinamente aplicada na superfície de um sólido, a perturbação gerada se propaga através dele como ondas de tensão. Deste modo, a propagação das ondas gera deformações elásticas no material, provocando oscilações nas partículas do meio. Dependendo da direção de oscilação das partículas em relação à direção de propagação

das ondas, existem diferentes modos de propagação das ondas de tensão. Os dois modos principais são: compressional, correspondente às ondas longitudinais e distorcional, correspondente às ondas de cisalhamento (METHA; MONTEIRO, 2008; MALHOTRA; CARINO, 2004).

As ondas longitudinais geram nas partículas oscilações para frente e para trás ao longo da direção de propagação das ondas, gerando regiões comprimidas e dilatadas e, conseqüentemente, alteração de volume do meio (figura 2.2). Este tipo de onda pode se propagar em meios sólidos, líquidos e gasosos (METHA; MONTEIRO, 2008).

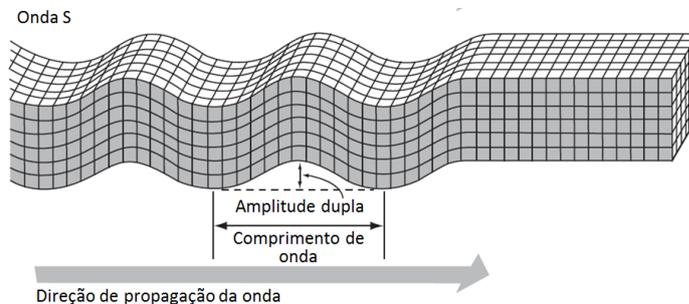
Figura 2.2 - Onda longitudinal.



Fonte: Adaptado de Metha e Monteiro (2008).

Com a passagem das ondas de cisalhamento, as partículas do meio se movem perpendicularmente à direção de propagação da onda, que não causa alteração de volume do meio, mas alteração de forma (figura 2.3). As ondas de cisalhamento se propagam apenas em meios sólidos (METHA; MONTEIRO, 2008; MALHOTRA; CARINO, 2004).

Figura 2.3 - Onda de cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Metha e Monteiro (2008).

Os geofísicos foram os pioneiros no estudo experimental de propagação das ondas, principalmente com relação às medições das ondas geradas durante terremotos. Em um terremoto as ondas longitudinais se deslocam mais rápido do que as de cisalhamento. Assim,

as ondas longitudinais são as primeiras a serem registradas por um sismógrafo. Por este motivo, elas também são chamadas de ondas primárias, ou ondas P, e as ondas de cisalhamento são chamadas de ondas secundárias, ou ondas S. No concreto, a velocidade das ondas de cisalhamento é cerca de 60% da velocidade das ondas longitudinais (METHA; MONTEIRO, 2008; MALHOTRA; CARINO, 2004). As tabelas 2.2 e 2.3 apresentam as velocidades das ondas longitudinais e de cisalhamento, respectivamente, em alguns materiais.

Tabela 2.2- Velocidade das ondas longitudinais.

Material	V (m/s)
Ar	330
Alumínio	6320
Cobre	4700
Ouro	3240
Aço	5900
Magnésio	5770
Prata	3600
Água	1480

Fonte: Adaptado de Krautkranerp (1990).

Tabela 2.3- Velocidade das ondas de cisalhamento.

Material	V (m/s)
Ar	-
Alumínio	3130
Cobre	2260
Ouro	1200
Aço	3230
Magnésio	3050
Prata	1590
Água	-

Fonte: Adaptado de Krautkranerp (1990).

As velocidades das ondas ultrassônicas no concreto podem variar em função de diversos fatores como a composição do concreto, tipos de agregados, vazios como porosidade e danificação, não uniformidade do material, entre outros (HAACH; RAMIREZ, 2016; GERCINDO, 2011; MALHOTRA; CARINO, 2004; POPOVICS, 2003). Whitehurst (1966), propôs uma classificação para concretos convencionais com densidade de aproximadamente 2400 kg/m^3 baseada na velocidade das ondas ultrassônicas longitudinais como indicador da qualidade do concreto (tabela 2.4). No entanto, o autor afirmou que uma abordagem melhor envolveria comparações das velocidades com regiões da estrutura nas quais se sabe que apresentam qualidade aceitável.

Tabela 2.4 - Qualidade do concreto com base na velocidade das ondas ultrassônicas.

Velocidade (m/s)	Condições do concreto
> 4575	Excelente
3660 - 4575	Boa
3050 - 3660	Regular
2135 - 3050	Pobre
< 2135	Muito pobre

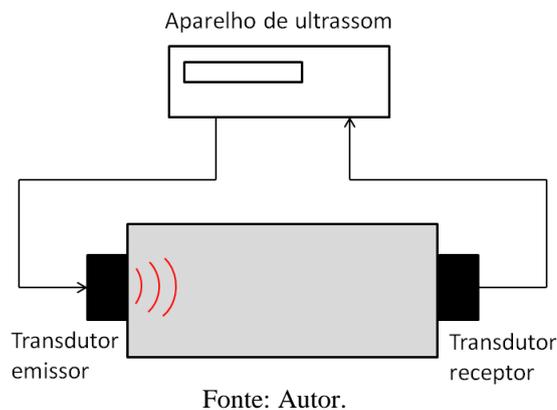
Fonte: Adaptado de Whitehurst (1966).

2.2 Ensaio ultrassônico

O ensaio ultrassônico é não destrutivo, uma vez que é baseado na propagação de ondas ultrassônicas nos elementos ensaiados, o que não gera danos a eles. Este ensaio é bastante utilizado para realizar um controle de qualidade de peças de aço, pois permite detectar bolhas de gás e trincas que podem ser geradas durante o processo de fabricação. No concreto, o ensaio com o ultrassom é bastante aplicado na verificação de danos, não homogeneidades e também para a determinação das propriedades elásticas dos materiais. Por ser um ensaio não destrutivo, possibilita ensaiar um mesmo local do elemento inúmeras vezes, o que permite realizar um monitoramento das condições do material ao longo do tempo (MALHOTRA; CARINO, 2004; ANDREUCCI, 2016).

No ensaio ultrassônico, o transdutor emissor transmite os pulsos de ondas ultrassônicas no interior do elemento e um transdutor receptor, localizado a uma distância L do emissor, recebe os pulsos propagados através do elemento (figura 2.4). O aparelho de ultrassom indica o tempo de propagação do pulso de ondas (t) e a velocidade de propagação (V), que é calculada pelo aparelho conforme equação 2.6 (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Figura 2.4 - Esquema de ensaio ultrassônico.

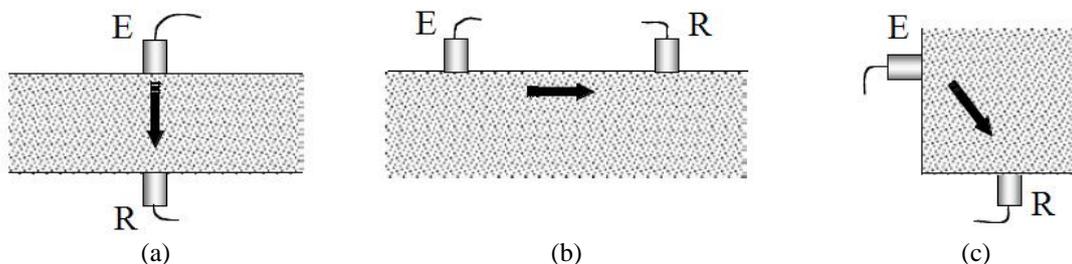


$$V = \frac{L}{t} \quad (2.6)$$

O ensaio de ultrassom em estruturas de concreto é normalizado pela ABNT NBR 8802:2019, segundo a qual os transdutores podem ser posicionados de acordo com três arranjos: (a) transmissão direta, com os transdutores acoplados nas faces opostas do elemento (figura

2.5a), (b) transmissão indireta, com os transdutores na mesma face do elemento (figura 2.5b) e (c) transmissão semidireta, com os transdutores localizados nas faces adjacentes (figura 2.5c).

Figura 2.5 - Arranjos dos transdutores (E = emissor; R = receptor): (a) transmissão direta; (b) transmissão indireta (c) transmissão semidireta.



Fonte: Adaptado de Malhotra e Carino (2004).

A superfície do transdutor deve estar em total contato com a superfície do elemento, sem a presença de ar. O ar pode introduzir erros na indicação do tempo de propagação pelo aparelho de ultrassom, pois uma parcela desprezível de ondas longitudinais pode ser transmitida através dele e as ondas de cisalhamento não são transmitidas. Um bom acoplamento é adquirido utilizando um material acoplante entre a superfície do transdutor e a superfície do elemento ensaiado (MALHOTRA; CARINO, 2004). Além disto, de acordo com a ABNT NBR 8802:2019, para garantir o bom acoplamento, as superfícies dos elementos devem ser planas, lisas e estar limpas.

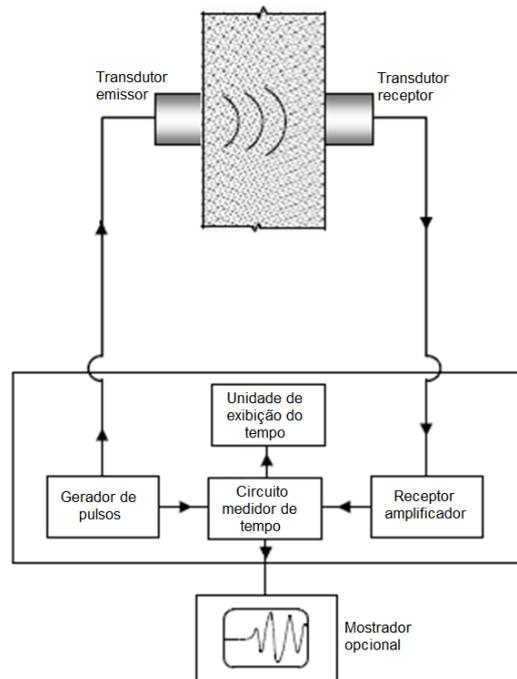
2.2.1 Equipamentos utilizados no ensaio ultrassônico

De acordo com Malhotra e Carino (2004), no ensaio ultrassônico são utilizados:

- a) um aparelho de ultrassom, que possui um circuito gerador de pulsos, um circuito amplificador, um circuito de medição de tempo e um mostrador que exhibe o tempo de propagação medido;
- b) dois transdutores, um emissor e um receptor;
- c) dois cabos axiais para conectar os transdutores ao aparelho de ultrassom;
- d) um computador para a visualização dos sinais dos pulsos recebidos.

A figura 2.6 ilustra os equipamentos utilizados no ensaio.

Figura 2.6 - Equipamentos do ensaio ultrassônico.

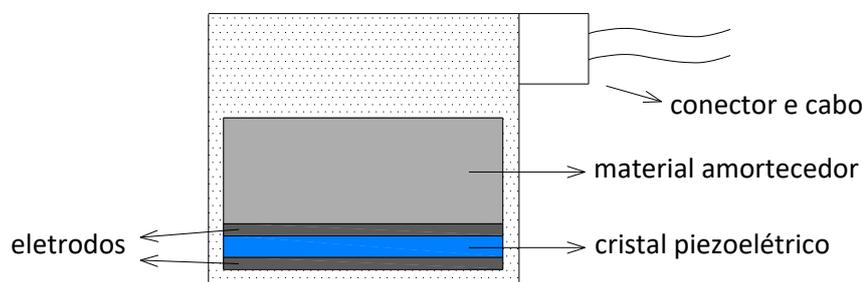


Fonte: Adaptado de Malhotra e Carino (2004).

2.2.2 Geração das ondas ultrassônicas

As ondas ultrassônicas são geradas pelo transdutor por meio do efeito piezoelétrico reverso. Este efeito é uma característica natural de alguns cristais como o quartzo e o titanato de bário. O transdutor possui uma placa de um cristal piezoelétrico revestida por dois eletrodos no seu interior (figura 2.7).

Figura 2.7 – Transdutor de ultrassom.



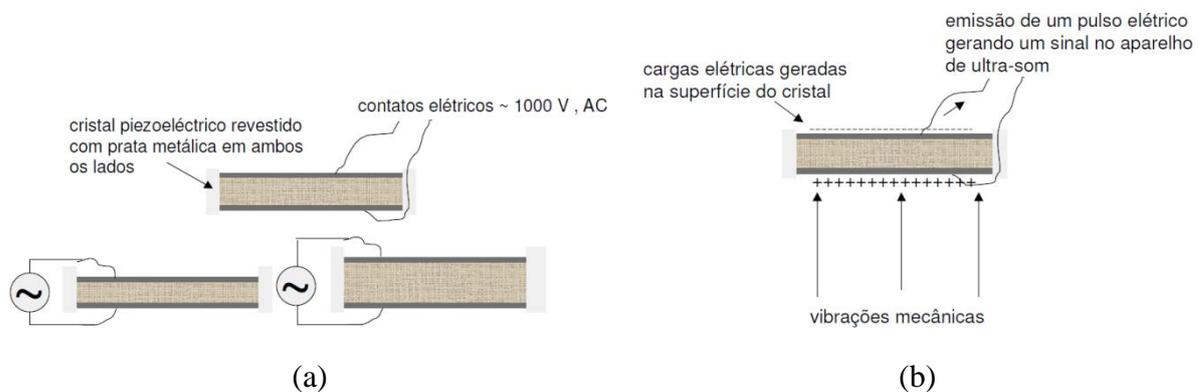
Fonte: Autor.

Se os eletrodos que revestem o cristal piezoelétrico forem carregados eletricamente, a placa de cristal comporta-se como se estivesse sobre pressão e diminui de espessura, fenômeno denominado de efeito piezoelétrico reverso e que ocorre no transdutor emissor. O circuito gerador de pulsos do aparelho de ultrassom gera pulsos de corrente alternada, submetendo os

eletrodos do transdutor emissor a uma alta tensão elétrica alternada, o que faz com que o cristal se contraia e expanda ciclicamente (figura 2.8a). O resultado é a geração de ondas sonoras com alta frequência, o ultrassom (ANDREUCCI, 2016).

Quando uma placa de cristal piezoelétrico é pressionada, surgem cargas elétricas em sua superfície, efeito conhecido como piezoelétrico e ocorre no transdutor receptor. As ondas ultrassônicas geram vibrações no cristal do transdutor que as recebe, fazendo com que eles fiquem carregados eletricamente e sejam emitidos pulsos elétricos para o aparelho de ultrassom (figura 2.8b). Neste, os sinais são tratados eletricamente e apresentados em forma de um gráfico da amplitude da onda em função do tempo.

Figura 2.8 - Cristal piezoelétrico: (a) efeito piezoelétrico reverso e (b) efeito piezoelétrico.

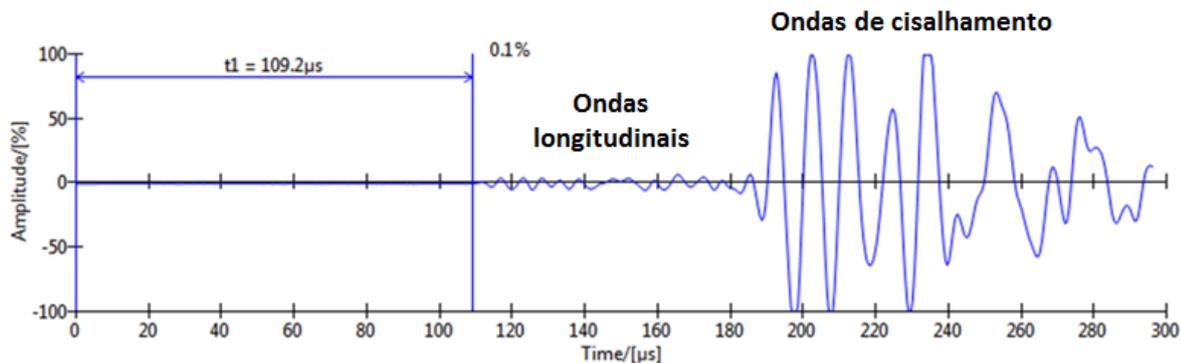


Fonte: Andreucci (2016).

2.2.3 Obtenção do tempo de propagação das ondas

Existem transdutores específicos para emitir ondas longitudinais e ondas de cisalhamento, chamados de transdutores longitudinais e transdutores de cisalhamento, respectivamente. No entanto, ao emitir um tipo de onda também é gerada uma parcela do outro tipo, conforme mostra a figura 2.9. Ao gerar um pulso de ondas com o transdutor de cisalhamento o sinal recebido é o apresentado nesta figura. Observa-se que não são recebidas apenas ondas de cisalhamento, mas também ondas longitudinais, que por serem mais velozes, chegam primeiro ao transdutor receptor. O equipamento de ultrassom determina o tempo de chegada da primeira frente de onda que chega ao transdutor receptor, por isto, o tempo de propagação apresentado é o das ondas longitudinais.

Figura 2.9 - Sinal do pulso de ondas recebido pelo transdutor de cisalhamento.



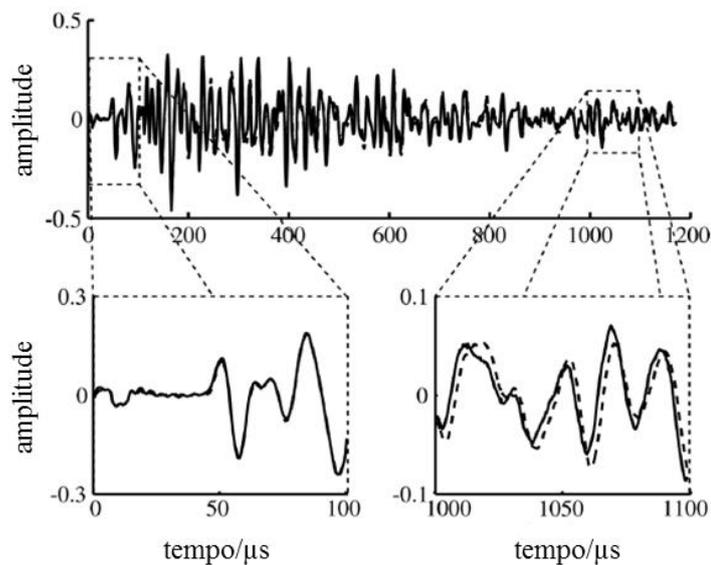
Fonte: Autor.

Será visto mais adiante que a variação de fatores como a quantidade de fissuras e o nível de tensão de um material altera o tempo de propagação das ondas ultrassônicas, o que gera a necessidade de avaliar a diferença de tempo de propagação entre dois sinais ultrassônicos emitidos em um material com diferentes condições de fissuração ou nível de tensão. Então, nestes casos, não se procura determinar o tempo de propagação de um tipo de onda contido em um sinal, mas a diferença de tempo de propagação entre dois sinais diferentes. Atualmente, o método comumente usado para determinar a diferença de tempo entre dois sinais ultrassônicos é o da Interferometria por Ondas Coda, conhecido como CWI em inglês, que significa “Coda Wave Interferiometry”. O método, usado originalmente por geofísicos, se baseia na realização de uma correlação cruzada na parte do sinal referente às “ondas tardias”, aquelas que por sofrerem grandes dispersões durante sua propagação no material heterogêneo, chegam com atraso no transdutor receptor. A correlação cruzada é uma função que permite determinar a diferença de tempo entre dois sinais (PLANÈS; LAROSE, 2013; PAYAN et al., 2009).

De acordo com Planès e Larose (2013), quando o ultrassom é emitido no concreto com frequências abaixo de 50 kHz, as ondas sofrem fraca dispersão e atenuação. No entanto, ao se propagarem com frequências acima de 100 kHz, as ondas interagem fortemente com as heterogeneidades do concreto e entram num regime de dispersão múltipla, no qual as ondas colidem aleatoriamente com diversas heterogeneidades antes de alcançar o transdutor receptor. O regime de dispersão múltipla, além de gerar atenuação das ondas também faz com que ocorram atrasos na chegada das ondas ultrassônicas, gerando as denominadas “ondas coda”. Planès e Larose (2013) afirmam que uma importante característica das ondas coda é sua alta sensibilidade diante de pequenas alterações no meio. Isto ocorre porque as ondas que sofrem múltiplas dispersões permanecem um tempo muito maior no material do que aquelas que chegam primeiro ao transdutor receptor, denominadas “ondas diretas”. Assim, as ondas coda

acumulam os efeitos das mudanças muito pequenas encontradas ao longo de sua propagação, o que faz com que uma mudança que não é detectada pelas ondas diretas se tornem “visíveis” para as ondas coda. Como exemplo, a figura 2.10, apresentada no trabalho de Stahler et al. (2011), mostra dois sinais de ondas ultrassônicas obtidos para diferentes valores de tensão de compressão aplicados num corpo de prova cilíndrico de concreto: 2 MPa (linha tracejada) e 2,4 MPa (linha contínua). Nenhuma diferença entre os sinais é visível quando a janela de tempo analisada é referente às primeiras ondas que chegaram ao transdutor. No entanto, ao observar uma janela de tempo tardia, onde estão situadas as ondas coda, fica clara a diferença de tempo entre os dois sinais.

Figura 2.10 - Comparação de dois sinais ultrassônicos por meio das ondas diretas e das onda coda.



Fonte: Stahler et al. (2011).

O método da Interferometria por Ondas Coda realiza uma correlação cruzada entre dois sinais de ondas ultrassônicas, emitidos num meio perturbado e não perturbado, na parte correspondente às ondas tardias. Um dos métodos usados para fazer isto é o método dos deslocamentos. No método dos deslocamentos, a função correlação cruzada (CC) fornece a similaridade entre dois sinais, perturbado e não perturbado, por meio do deslocamento do sinal perturbado no eixo do tempo (t). Durante o procedimento, uma janela de tempo do sinal perturbado com duração $2T$ e tempo central t_c é deslocada no eixo do tempo a cada variação de tempo Δt . A cada Δt , o valor da função correlação cruzada é calculado. Existe um valor de Δt para o qual esta função atinge seu valor máximo, denominado $\Delta t_{CCmáx}$. Este valor corresponde à diferença de tempo entre os dois sinais, ou seja, ao tempo de atraso entre o sinal perturbado e

o não perturbado. A função correlação cruzada normalizada é apresentada na equação 2.7. Nela, u_p e u_{np} são os sinais perturbado e não perturbado, respectivamente. O cálculo da variação relativa entre estes dois sinais é dado pela equação 2.8. (GRÊT; SNIEDER; SCALES, 2006; PLANÈS; LAROSE, 2013; SNIEDER et. al, 2002).

$$CC(\Delta t) = \frac{\int_{t_c-T}^{t_c+T} u_{np}(t)u_p(t-\Delta t)}{\sqrt{\int_{t_c-T}^{t_c+T} u_{np}^2(t)dt \int_{t_c-T}^{t_c+T} u_p^2(t-\Delta t)dt}} \quad (2.7)$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{\Delta t_{CCm\acute{a}x}}{t_c} \quad (2.8)$$

Outro método que pode ser usado na Interferometria por Ondas Coda é do alongamento. Assim como o método dos deslocamentos, o do alongamento também determina a variação relativa de velocidade por meio do valor máximo da função correlação cruzada (CC). Neste método, o sinal não perturbado, u_{np} , é alongado ou comprimido de $u_{np}(t)$ até $u_{np}[t(1+\tau)]$ usando um fator τ para simular a variação na velocidade de V_0 até $V_0(1+\tau)$. A similaridade entre o sinal não perturbado (u_{np}) e o perturbado (u_p) é avaliada usando a função correlação cruzada normalizada (equação 2.9) dentro de uma janela de tempo com duração $2T$ e tempo central t_c . O valor de τ que gera o valor máximo para CC ($\tau_{CCm\acute{a}x.}$) é a variação relativa de velocidade ($\Delta V/V_0$) correspondente à análise realizada com a janela de tempo $2T$ com tempo central t_c .

$$CC(\tau) = \frac{\int_{t_c-T}^{t_c+T} u_{np}(t(1+\tau))u_p(t)}{\sqrt{\int_{t_c-T}^{t_c+T} u_{np}^2(t(1+\tau))dt \int_{t_c-T}^{t_c+T} u_p^2(t)dt}} \quad (2.9)$$

A Interferometria por Ondas Coda é bastante utilizada para monitorar atividades sísmicas e vulcânicas, avaliar danos e variação de temperatura em materiais e também em estudos envolvendo a acustoelasticidade (SNIEDER et. al, 2002; GRÊT; SNIEDER; OZBAY, 2006; MARTINI et al., 2009; ZACCARELLI et al., 2009; PLANÈS; LAROSE, 2013; PAYAN et. al, 2009).

2.3 Fatores que afetam a velocidade das ondas ultrassônicas no concreto

Existem diversos fatores que influenciam a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no concreto. O seu conhecimento auxilia na análise de resultados experimentais. Serão apresentados alguns destes fatores.

2.3.1 Vazios

A velocidade das ondas ultrassônicas é afetada pela presença de fissuras e porosidade no concreto. De acordo com Shokouhi, Zoega e Wiggenhauser (2010), a presença de fissuras resulta na redução da velocidade das ondas que se propagam num meio, uma vez que, ao colidir com as fissuras, as ondas são dispersas para fora do seu percurso original. As mudanças na velocidade da onda dependem do tamanho, condição (fissura vazia ou preenchida com algum líquido) e da distribuição das fissuras no volume do elemento. A influência da danificação no concreto sobre a dissipação das ondas ultrassônicas ao se propagar neste material foi estudada por Ahn et al. (2020). Para simular as micro fissuras, fibras de polipropileno com propriedades mecânicas bastante baixas foram incorporadas em amostras de concreto. Foram utilizadas diferentes quantidades de fibras para representar diferentes níveis de dano no material. Os autores observaram aumento na dissipação das ondas ultrassônicas em função da maior danificação do concreto. O mesmo efeito é observado com relação à porosidade. Naffa et al. (2002) realizaram um experimento em que metade de um elemento prismático de concreto foi mantido imerso numa solução ácida por alguns dias a fim de gerar degradação no material. Na parte degradada do material, pela presença de grande porosidade, os autores observaram diminuição de 23% na velocidade das ondas em relação à parte íntegra.

2.3.2 Dimensão, quantidade e tipo do agregado graúdo

A velocidade das ondas ultrassônicas é afetada pelo tipo e pela quantidade dos agregados. Por causa da maior porosidade da pasta de cimento, a velocidade das ondas é menor neste material do que nos agregados. Assim, o aumento na quantidade de agregados no concreto gera aumento na velocidade das ondas (MALHOTRA; CARINO, 2004). De acordo com Gercindo (2011), a velocidade das ondas é maior em agregados mais densos.

As dimensões dos agregados também afetam a velocidade das ondas ultrassônicas, pois influenciam a porosidade e a fissuração da zona de transição (ZT) que existe na interface entre

os agregados graúdos e a pasta de cimento. No concreto fresco recém-compactado, filmes de água se formam em torno das grandes partículas de agregado, o que contribui para uma maior relação água / cimento na região próxima aos agregados graúdos, a zona de transição. Quanto maior for o tamanho dos agregados, mais espesso será o filme de água, conseqüentemente, maior será a porosidade e a fissuração da zona de transição. A fissuração surge por conta dos movimentos diferenciais entre o agregado e a pasta de cimento durante a secagem e o resfriamento do concreto. Portanto, concretos com agregados maiores, terão uma zona de transição mais porosa e fissurada, o que diminui a velocidade das ondas ultrassônicas (ABO-QUDAIS, 2005; METHA, MONTEIRO, 2008).

2.3.3 Relação água / cimento

De acordo com Abo-Qudais (2005), a relação água / cimento (a/c) no concreto tem efeito significativo na velocidade das ondas ultrassônicas. Os autores observaram que a velocidade diminui com o aumento da relação a/c . Este efeito foi explicado pelo fato de que, o aumento desta relação gera aumento na porosidade e na fissuração da pasta de cimento e da zona de transição. Zhang et al. (2015) também estudaram a influência da relação a/c na velocidade das ondas e chegaram à mesma conclusão.

2.3.4 Idade do concreto

O efeito da idade do concreto na velocidade das ondas ultrassônicas é similar ao efeito da idade no desenvolvimento da resistência à compressão do material. Inicialmente, as velocidades aumentam rapidamente e, depois, tendem a se estabilizar (MALHOTRA; CARINO, 2004). Liu et al. (2014) mostraram que a velocidade da onda no concreto fresco aumenta continuamente com a produção dos compostos hidratados.

2.3.5 Umidade do concreto

De acordo com a ASTM C 597-02 (2003), a velocidade das ondas ultrassônicas no concreto saturado pode ser até 5% maior do que no concreto seco. Isto ocorre, porque no concreto saturado, os vazios estão preenchidos por água e a velocidade das ondas é maior na água do que no ar. Portanto, é necessário cuidado na interpretação dos resultados em áreas da estrutura de concreto com diferentes teores de umidade (GERCINDO, 2011).

2.3.6 Temperatura do concreto

Variações de temperatura entre 10°C e 30°C causam efeitos insignificantes na velocidade das ondas ultrassônicas. Correções na velocidade das ondas devem ser realizadas apenas para temperaturas fora deste intervalo, de acordo com a tabela 2.5 (BS:1881:203, 1986). A diminuição na velocidade em temperaturas entre 40°C e 60°C ocorre pela geração de microfissuras no concreto. O aumento da velocidade quando a temperatura é 0°C ou inferior, se deve ao congelamento da água no interior do concreto (RILEM, 1972 apud GERCINDO, 2011).

Tabela 2.5- Efeito da temperatura na velocidade das ondas ultrassônicas.

Temperatura (°C)	Correção da velocidade medida (%)	
	Concreto seco	Concreto saturado
60	5	4
40	2	1,7
20	0	0
0	-0,5	-1
-4	-1,5	-7,5

Fonte: BS:1881:203 (1896)

Hwang et al. (2018), avaliaram a degradação no concreto submetido à altas temperaturas por meio das velocidades das ondas ultrassônicas. No trabalho, as velocidades das ondas em amostras de concreto submetidas à temperaturas de até 700 °C foram medidas ao longo de todo o aquecimento. Foi observada que a fissuração gerada pelo aquecimento gerou diminuição das velocidades. Além disto, de acordo com os autores, a largura das fissuras no concreto, geradas pelas altas temperaturas, aumenta após o resfriamento do material e o aquecimento a uma temperatura mais alta resultou em maiores larguras nas fissuras após o resfriamento. Este fenômeno pôde ser observado por meio da diminuição da velocidade das ondas ultrassônicas após o resfriamento.

2.3.7 Presença de armaduras

As armaduras no interior do elemento de concreto podem exercer grande influência na velocidade das ondas ultrassônicas, pois a velocidade no aço é maior do que no concreto. Portanto, as velocidades das ondas medidas em regiões do concreto próximas às armaduras serão maiores do que as medidas num concreto de mesma composição, mas sem armaduras. O

aumento na velocidade depende da proximidade das medições em relação às barras de aço, do diâmetro e do número de barras e da orientação das barras com respeito ao caminho de propagação das ondas. Há fatores de correção que devem ser aplicados quando existirem armaduras no caminho de propagação das ondas (BS:1881:203, 1986; MALHOTRA; CARINO, 2004).

2.3.8 Contato do transdutor

Um bom acoplamento entre o transdutor e a superfície do elemento de concreto é importante para evitar erros nas medições de tempo de propagação das ondas. Para isto, uma camada de acoplante deve ser empregada entre as superfícies do transdutor e do elemento ensaiado a fim de eliminar a presença de ar durante a transmissão da onda para o material. Deve também ser aplicada pressão constante no transdutor durante as emissões das ondas ultrassônicas. Além disto, a superfície do elemento ensaiado deve estar limpa. (MALHOTRA; CARINO, 2004).

2.3.9 Nível de tensão

Quando o concreto é submetido a níveis de tensão entre 30% e 50 % da resistência última à compressão do concreto (f_c), as microfissuras da zona de transição aumentam em comprimento, abertura e quantidade. Entre 50% e 60% do f_c , novas fissuras se formam na matriz de cimento. Com maior nível de tensão, a proliferação de fissuras na matriz aumenta e o sistema de fissuração se torna instável quando o valor da tensão atinge 75% do f_c (METHA; MONTEIRO, 2008). O aumento da fissuração no concreto leva à diminuição na velocidade das ondas ultrassônicas (SHOKOUHI; ZOEGA; WIGGENHAUSER, 2010). Então, o nível de tensão no concreto afeta a velocidade, pois dependendo do valor da tensão aplicada, ocorre aumento da fissuração e, conseqüentemente, a diminuição da velocidade das ondas. No entanto, Hughes e Kelly (1953) mostraram por meio do desenvolvimento da teoria da acustoelasticidade que existe outro efeito que faz o aumento da tensão influenciar na velocidade das ondas, fazendo-as aumentar com o aumento da compressão no material. Trata-se do efeito acustoelástico que será melhor discutido no item 2.4. Portanto, ao submeter um elemento de concreto a um determinado valor de tensão de compressão, o efeito do dano e o efeito acustoelástico irão ocorrer ao mesmo tempo gerando variações contrárias nas velocidades das

ondas, ou seja, diminuição e aumento das velocidades, respectivamente (SHOKOUHI; ZOEGA; WIGGENHAUSER, 2010; RESENDE, 2018).

2.4 Acustoelasticidade

A teoria da acustoelasticidade surgiu em 1953 por meio de Hughes e Kelly e mostra a dependência entre a velocidade das ondas ultrassônicas e a tensão no material. Primeiramente, serão apresentadas as equações das velocidades das ondas num meio livre de tensões. Em seguida, as equações das velocidades num meio com tensão aplicada serão apresentadas com base na teoria da acustoelasticidade.

2.4.1 Velocidade das ondas ultrassônicas em meio sólido, elástico, homogêneo e isotrópico sem tensão

A velocidade das ondas ultrassônicas se propagando em um meio elástico, homogêneo e isotrópico é obtida a partir das equações de movimento. Admitindo deformações infinitesimais e fazendo uso da Lei de Hooke, as equações de movimento em termos de tensão nas direções dos eixos a_1 , a_2 e a_3 (equações 2.10, 2.11 e 2.12, respectivamente) podem ser escritas em termos de deslocamentos conforme equações 2.13, 2.14 e 2.15 (TIMOSHENKO, 1980).

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial a_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial a_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial a_3} = \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \sigma_{21}}{\partial a_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial a_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial a_3} = \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \sigma_{31}}{\partial a_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial a_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial a_3} = \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

$$(\lambda + G) \frac{\partial \theta}{\partial a_1} + G \nabla^2 u_1 - \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = 0 \quad (2.13)$$

$$(\lambda + G) \frac{\partial \theta}{\partial a_2} + G \nabla^2 u_2 - \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = 0 \quad (2.14)$$

$$(\lambda + G) \frac{\partial \theta}{\partial a_3} + G \nabla^2 u_3 - \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = 0 \quad (2.15)$$

Onde,

ρ é a densidade do material;

$\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ é a expansão volumétrica;

u_1, u_2 e u_3 são os deslocamentos nas direções a_1, a_2 e a_3 , respectivamente;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial a_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial a_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial a_3^2};$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)};$$

G e E são os módulos de elasticidade transversal e longitudinal, respectivamente;

ν é o coeficiente de Poisson;

t é o tempo.

Supondo, primeiramente, que ondas de cisalhamento se propagam pelo material, a deformação produzida pelas ondas é de distorção e acompanhada de rotação. Além disto, a expansão volumétrica (θ) é nula. Consequentemente, as equações 2.13 a 2.15 tornam-se as equações 2.16 a 2.18. Estas são as equações das ondas de cisalhamento (TIMOSHENKO, 1980).

$$G\nabla^2 u_1 - \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = 0 \quad (2.16)$$

$$G\nabla^2 u_2 - \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = 0 \quad (2.17)$$

$$G\nabla^2 u_3 - \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = 0 \quad (2.18)$$

Para ondas de cisalhamento se propagando na direção a_1 e com deslocamento das partículas na direção a_2 : $u_1 = u_3 = 0$ e u_2 depende apenas de a_1 e de t . Deste modo, a equação 2.17 torna-se a equação 2.19, onde G / ρ foi chamado de V_c^2 conforme equação 2.20. A solução desta equação mostra que V_c é a velocidade da onda de cisalhamento (equação 2.21) (ORTEGA et al., 2011; TIMOSHENKO, 1980).

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u_2}{\partial a_1^2} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = V_c^2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial a_1^2} \quad (2.20)$$

$$V_c = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.21)$$

Considerando agora que ondas longitudinais se propagam pelo material, ou seja, a deformação produzida pelas ondas não é acompanhada de rotação, as equações 2.13 a 2.15 tornam-se as equações 2.22 a 2.24 (ORTEGA et al., 2011; TIMOSHENKO, 1980).

$$(\lambda + 2G)\nabla^2 u_1 - \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = 0 \quad (2.22)$$

$$(\lambda + 2G)\nabla^2 u_2 - \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = 0 \quad (2.23)$$

$$(\lambda + 2G)\nabla^2 u_3 - \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = 0 \quad (2.24)$$

Para ondas longitudinais se propagando na direção a_1 : $u_2 = u_3 = 0$ e o deslocamento u_1 das partículas depende só de a_1 e t . Deste modo, a equação 2.22 torna-se a 2.25, onde o termo $(\lambda+2G)/\rho$ foi chamado de V_L^2 resultando na equação 2.26. A solução desta equação apresenta V_L como a velocidade da onda longitudinal (equação 2.27) (ORTEGA et al., 2011; TIMOSHENKO, 1980).

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \frac{(\lambda + 2G)}{\rho} \frac{\partial^2 u_1}{\partial a_1^2} = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = V_L^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial a_1^2} = 0 \quad (2.26)$$

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (2.27)$$

As equações 2.21 e 2.27 mostram que quando as ondas ultrassônicas se propagam num meio sólido, homogêneo, isotrópico e livre de tensões aplicadas, suas velocidades dependem apenas das propriedades elásticas do material (ν , λ e G) e da densidade (ρ), apresentando valores constantes em qualquer direção de propagação. No entanto, de acordo com a teoria da acustoelasticidade, ao submeter o material a um estado de tensão, as velocidades de propagação das ondas passam a depender das direções de propagação da onda e da magnitude da tensão aplicada. Assim, o sólido previamente isotrópico se torna anisotrópico com relação às velocidades das ondas. A influência do estado de tensões, ou equivalentemente, do estado de deformações, sobre as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas é chamada de efeito acustoelástico (ORTEGA et al., 2011).

2.4.2 Velocidade das ondas ultrassônicas em meio sólido, elástico, homogêneo e isotrópico sob tensão

Para avaliar o efeito acustoelástico, a teoria da elasticidade dinâmica linear se mostra insuficiente. Deste modo, é necessário incorporar elementos não lineares na equação constitutiva linear do material (equação 2.28). Isto é feito ao adotar a medida de deformação de Green, η_{ij} (equação 2.29), no lugar da medida de deformação de engenharia, ε_{ij} (equação 2.30), na expressão da energia específica de deformação do material e ao considerar não desprezível o termo de terceira ordem desta expressão (equação 2.31). Assim, a equação constitutiva do material passa a ser representada pela equação 2.32, onde S_{ij} é o segundo tensor de Piola – Kirchoff. O uso das relações não lineares na equação da energia e constitutiva permite revelar a influência da tensão sobre as velocidades das ondas ultrassônicas (ORTEGA et al., 2011).

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2.28)$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial a_j} + \frac{\partial u_j}{\partial a_i} + \frac{\partial u_k}{\partial a_i} \frac{\partial u_k}{\partial a_j} \right) \quad (2.29)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial a_j} + \frac{\partial u_j}{\partial a_i} \right) \quad (2.30)$$

$$\psi(\eta_{ij}) = \psi_0 + C_{ij} \eta_{ij} + \frac{1}{2!} C_{ijkl} \eta_{ij} \eta_{kl} + \frac{1}{3!} C_{ijklmn} \eta_{ij} \eta_{kl} \eta_{mn} \quad (2.31)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial u_e(\eta)}{\partial \eta_{ij}} = C_{ijkl} \eta_{kl} + C_{ijklmn} \eta_{kl} \eta_{mn} \quad (2.32)$$

Onde,

$i, j, k, l, m, n = 1, 2, 3$;

C_{ijkl} = tensor que contém as constantes elásticas de segunda ordem, λ e G ;

C_{ijklmn} = tensor que contém as constantes elásticas de Murnaghan l, m e n ;

u_i, u_j e u_k = deslocamentos;

a_i e a_j = coordenadas iniciais de um ponto.

O equacionamento que descreve o efeito acustoelástico num material elástico e isotrópico foi desenvolvido por Hughes e Kelly (1953) para um sólido onde uma tensão inicial finita é aplicada. Com esta tensão constante, ondas ultrassônicas longitudinais ou de cisalhamento são emitidas ao longo das direções principais deste sólido. Para o desenvolvimento, os autores utilizaram coordenadas Lagrangianas e a teoria de Murnaghan (1951) para deformações finitas. Assumindo que as coordenadas (a_1, a_2, a_3) e (x_1, x_2, x_3) se referem às posições inicial e atual de um corpo, respectivamente, a posição atual (x_i) é obtida pela equação 2.33 com $i = 1, 2, 3$. Nesta equação, $A_{(i)}a_i$ é uma parcela finita de deslocamento gerada quando, inicialmente, é aplicada uma tensão finita no material, onde A_i é uma constante que leva posição inicial (a_i) para a posição atual (x_i) . Ao manter a tensão aplicada constante e emitir as ondas ultrassônicas, é gerado o deslocamento infinitesimal $U_i(a)$. O deslocamento do ponto (u_i) é mostrado na equação 2.34.

$$x_i = A_{(i)}a_i + U_i(a) \quad (2.33)$$

$$u_i = x_i - a_i = (A_{(i)} - 1)a_i + U_i(a) \quad \text{com } U_i(a) \ll (A_{(i)} - 1) \quad (2.34)$$

O modelo de Hughes e Kelly (1953) considera uma deformação infinitesimal superposta numa deformação triaxial finita homogênea com os eixos coordenados coincidindo com os eixos principais

A equação 2.35 apresenta a deformação de um ponto quando são aplicadas a tensão finita e as ondas ultrassônicas no sólido. Ao substituir as equações 2.36 e 2.37 na equação 2.35 e desprezar os valores de α com ordem superior a 1, quando multiplicado por ϵ , tem-se a equação 2.38. Portanto, a deformação fica composta por uma parcela finita homogênea na direção dos eixos principais, α_i , e uma parcela infinitesimal, ϵ_{ij} .

$$\eta_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial a_j} + \frac{\partial u_j}{\partial a_i} + \frac{\partial u_k}{\partial a_i} \frac{\partial u_k}{\partial a_j} \right) = \frac{1}{2} (A_{(i)}^2 - 1) \delta_{ij} + \frac{A_{(i)} A_{(j)}}{2} \left(\frac{\partial U_i(a)}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j(a)}{\partial x_i} \right) \quad (2.35)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{2} (A_{(i)}^2 - 1) \rightarrow A_{(i)} \approx 1 + \alpha_{(i)} \quad (2.36)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i(a)}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j(a)}{\partial x_i} \right) \quad (2.37)$$

$$\eta_{ij} = \alpha_{(i)} \delta_{ij} + (1 + \alpha_{(i)} + \alpha_{(j)}) \varepsilon_{ij} \quad (2.38)$$

Onde,

$A_{(i)}$ foi determinado pela expansão em série de Taylor truncada em 1ª ordem.

A equação da energia específica de deformação (ψ) proposta por Murnaghan (1951) e adotada por Hughes e Kelly (1953) expressa a energia em função dos invariantes de deformação, I_1 , I_2 , e I_3 , de acordo com a equação 2.39, na qual l , m e n são as constantes elásticas de Murnaghan. Os termos da equação da energia com ordem de deformação superior a três foram desprezados pelo autor. Ao derivar esta equação em relação ao tensor η_{ij} , é obtido o segundo tensor de Piola Kirchoff, S_{ij} , (equação 2.43), onde $\theta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ e e é o símbolo de permutação que vale 1 quando os índices 1, 2, 3 estão ordenados no sentido horário, -1 quando os índices estão ordenados no sentido anti-horário e 0 nos demais casos. Na equação 2.43, foram considerados desprezíveis os termos em que ε_{ij} apresenta potência maior que 1, os termos de ε_{ij} cujos coeficientes apresentam potências de α_i maiores que 1 e os termos independentes de ε_{ij} que apresentam potências de α_i maiores que 2.

$$\psi = \frac{(\lambda + 2G)}{2} I_1^2 - 2GI_2 + \frac{(l + 2m)}{3} I_1^3 - 2mI_1I_2 + nI_3 \quad (2.39)$$

$$I_1 = \eta_{ii} \quad (2.40)$$

$$I_2 = \frac{\eta_{ii}\eta_{jj} - \eta_{ij}\eta_{ji}}{2} \quad (2.41)$$

$$I_3 = e_{ijk} \eta_{ii} \eta_{jj} \eta_{kk} \quad (2.42)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial \psi}{\partial \eta_{ij}} = \left\{ \begin{array}{l} \theta \delta_{ij} (\lambda + \theta(l - m) + 2m\alpha_{(j)}) + \\ \delta_{ij} \left(2G\alpha_{(j)} + m \sum_k \alpha_k^2 \right) + \frac{1}{2} n \sum_{kl} e_{ikl} e_{jkl} \alpha_k \alpha_l + \\ \left[\delta_{kl} \delta_{ij} (\lambda + 2\theta(l - m) + 2m\alpha_{(j)}) + \right. \\ \left. 2\delta_{ij} \left(\lambda \sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} + m \sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} \right) + \right. \\ \left. n \frac{1}{2} \sum_p (e_{jpk} e_{ipl} + e_{jpl} e_{ipk}) \alpha_p + \right. \\ \left. (\delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{ki} \delta_{lj}) (G(1 + \alpha_{(i)} + \alpha_{(j)}) + m\theta) \right] \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \end{array} \right\} \quad (2.43)$$

O tensor de Cauchy (σ_{ij}) é calculado a partir do 2º tensor de Piola Kirchoff utilizando a equação 2.44, o que resulta na equação 2.45. Nesta equação, a tensão total (σ_{ij}) fica, então, representada pela equação 2.46, onde σ_{ij}^0 é a tensão inicial (equação 2.47), previamente aplicada, e $C_{ijkl} \frac{\partial U_k}{\partial x_l}$ é a parcela de tensão que surge ao emitir o ultrassom no elemento previamente carregado. A equação 2.48 apresenta o tensor constitutivo C_{ijkl} . A equação 2.45 implica que na ausência de deformação prévia ($\alpha = 0$), σ_{ij}^0 é nula e C_{ijkl} contém apenas as constantes de segunda ordem, λ e G .

$$\sigma_{ij} = \frac{F_{ik} \cdot S_{kl} \cdot F_{lj}}{J} \quad (2.44)$$

Onde,

F é o gradiente da função mudança de configuração.

$J = \rho_0 / \rho = \det(F)$ é o Jacobiano, no qual ρ_0 e ρ são as densidades no estado inicial e deformado (atual), respectivamente.

$$\sigma_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} \theta \delta_{ij} (\lambda + (l - m - \lambda)\theta + 2\alpha_{(j)}(m + \lambda - G)) + \\ \delta_{ij} \left(2G\alpha_{(j)} + 4G\alpha_{(j)}^2 + m \sum_k \alpha_k^2 \right) + \frac{1}{2} n \sum_{kl} e_{ikl} e_{jkl} \alpha_k \alpha_l + \\ \left[\delta_{kl} \delta_{ij} (\lambda + 2\theta(l - m - \lambda) + 2\alpha_{(j)}(m + \lambda - G)) + \right. \\ \left. 2\delta_{ij} \left(\lambda \sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} + m \sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} \right) + \right. \\ \left. n \frac{1}{2} \sum_p (e_{jpk} e_{ipl} + e_{jpl} e_{ipk}) \alpha_p + \right. \\ \left. (\delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{ki} \delta_{lj}) (2G(\alpha_{(j)} + \alpha_{(i)} + \alpha_{(l)}) + G + \theta(m + \lambda - G)) \right] \end{array} \right\} \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \quad (2.45)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + C_{ijkl} \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \quad (2.46)$$

$$\sigma_{ij}^0 = \left[\begin{array}{l} \theta \delta_{ij} (\lambda + (l - m - \lambda)\theta + 2\alpha_{(j)}(m + \lambda - G)) + \\ \delta_{ij} \left(2G\alpha_{(j)} + 4G\alpha_{(j)}^2 + m \sum_k \alpha_k^2 \right) + \frac{1}{2} n \sum_{kl} e_{ikl} e_{jkl} \alpha_k \alpha_l + \end{array} \right] \quad (2.47)$$

$$C_{ijkl} = \left[\begin{array}{l} \delta_{kl} \delta_{ij} (\lambda + 2\theta(l - m - \lambda) + 2\alpha_{(j)}(m + \lambda - G)) + \\ 2\delta_{ij} \left(\lambda \sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} + m \sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} \right) + \\ n \frac{1}{2} \sum_p (e_{jpk} e_{ipl} + e_{jpl} e_{ipk}) \alpha_p + \\ (\delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{ki} \delta_{lj}) (2G(\alpha_{(j)} + \alpha_{(i)} + \alpha_{(l)}) + G + \theta(m + \lambda - G)) \end{array} \right] \quad (2.48)$$

A equação de movimento fica, então, definida pela equação 2.49.

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial x_j \partial x_l} \quad (2.49)$$

É possível buscar soluções para a equação 2.49 que permitam achar expressões para as velocidades de propagação das ondas. A partir da solução desta equação são encontradas três expressões de velocidade para a propagação das ondas ao longo de um eixo principal: uma para a onda longitudinal (equação 2.50) e duas para ondas transversais (equações 2.51 e 2.52), cada uma polarizada ao longo das outras duas direções principais. Nestas equações, V_{ii} é a velocidade de uma onda longitudinal e V_{ij} e V_{ik} são as velocidades de ondas de cisalhamento. Portanto, o

primeiro índice indica a direção de propagação da onda e o segundo, a direção de polarização (ORTEGA et al., 2011).

Observa-se que, se a deformação inicial é nula ($\alpha = 0$), as equações 2.50 à 2.52 representam as velocidades das ondas ultrassônicas se propagando num meio isotrópico livre de tensões (equações 2.21 e 2.27). Portanto, as equações 2.50 à 2.52 são fundamentais para a avaliação do estado de tensões, descrevendo quantitativamente o efeito acustoelástico. Nota-se, no entanto, que estas equações são válidas apenas para ondas se propagando e vibrando ao longo dos eixos principais (ORTEGA et al., 2011).

$$\rho_0 V_{ii}^2 = \lambda + 2G + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10G)\alpha_i \quad (2.50)$$

$$\rho_0 V_{ij}^2 = G + (\lambda + m)\theta + 4G\alpha_i + 2G\alpha_j + \frac{1}{2}n\alpha_k \quad (2.51)$$

$$\rho_0 V_{ik}^2 = G + (\lambda + m)\theta + 4G\alpha_i + 2G\alpha_k + \frac{1}{2}n\alpha_j \quad (2.52)$$

Hughes e Kelly (1953) consideram suficiente avaliar as deformações α_i por meio da teoria linear, de modo que $\alpha_i = \varepsilon_i$. Assumindo que os eixos de deformação principais e os eixos de tensão principais são coincidentes, e utilizando a lei de Hooke, as deformações nas equações 2.50 à 2.52 são substituídas por suas relações com as tensões e os módulos elásticos. Deste modo, o efeito do estado de tensões sobre a velocidade das ondas passa a ser descrito. Para uma tensão uniaxial σ_{11} , atuante na direção do eixo 1 de um sólido isotrópico, as deformações ficam dadas por $\varepsilon_1 = \varepsilon$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \nu\varepsilon$ e as equações de velocidade das ondas ultrassônicas, em termos de tensão, ficam definidas conforme as equações 2.53 à 2.57, onde 1, 2 e 3 são os eixos principais.

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2G - \frac{\sigma_{11}}{3\lambda + 2G} \left[2l + \lambda + \frac{(\lambda + G)}{G} (4m + 4\lambda + 10G) \right] \quad (2.53)$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \rho_0 V_{13}^2 = G - \frac{\sigma_{11}}{3\lambda + 2G} \left[m + \frac{\lambda n}{4G} + 4\lambda + 4G \right] \quad (2.54)$$

$$\rho_0 V_{22}^2 = \rho_0 V_{33}^2 = \lambda + 2G - \frac{\sigma_{11}}{3\lambda + 2G} \left[2l - \frac{2\lambda}{G} (m + 4\lambda + 2G) \right] \quad (2.55)$$

$$\rho_0 V_{21}^2 = \rho_0 V_{31}^2 = G - \frac{\sigma_{11}}{3\lambda + 2G} \left[m + \frac{\lambda n}{4G} + \lambda + 2G \right] \quad (2.56)$$

$$\rho_0 V_{23}^2 = \rho_0 V_{32}^2 = G - \frac{\sigma_{11}}{3\lambda + 2G} \left[m - \frac{\lambda + G}{2G} n - 2\lambda \right] \quad (2.57)$$

Segundo Ortega et al. (2011), a relação entre as velocidades e as tensões podem ser linearizadas o que permite representar as equações 2.53 à 2.57 pela equação 2.58, onde, V_{ij}^σ e V_{ij}^0 são as velocidades no meio com e sem tensão, respectivamente, e A_{ij} é a constante acustoelástica que depende do material e do tipo de onda que se propaga no meio. Portanto, quando um sólido está submetido a um estado de tensões uniaxiais, σ_{11} , a velocidade de propagação de uma onda ultrassônica pode ser calculada pela equação 2.58.

$$\frac{V_{ij}^\sigma - V_{ij}^0}{V_{ij}^0} = \frac{\Delta V_{ij}}{V_{ij}^0} = A_{ij} \sigma_{11} \quad (2.58)$$

Segundo Ortega (2011), o efeito de deformações elásticas no material sobre a velocidade de propagação das ondas é pequeno. Deformações abaixo do limite elástico produzem mudanças relativas de velocidade ($\Delta V/V^0$) da ordem de 10^{-3} no aço.

Apesar de a teoria da acustoelasticidade apresentar a possibilidade de avaliar tensões num material com o uso do ultrassom, é necessária uma quantidade maior de estudos para chegar a este fim, principalmente quando se trata do concreto. O ultrassom é comumente utilizado para determinar as propriedades elásticas dos materiais e avaliar a homogeneidade e danos no interior dos elementos (SHAH; RIBAKOV; HIROSE, 2009; CHAI et al., 2010; BENMEDDOUR et al. 2012; BUI et al., 2013; GARNIER et al. 2013; WOLF; PIRSKAWETZ; FERREIRA; FAVARIN; MACEDO, 2015; ZANG, 2015; BENAICHA, M. et al., 2015; MORADI-MARANI et al. 2014; ANH VU et al. 2016; HAACH; RAMIREZ, 2016; HAACH; JULIANI; RAVANINI, 2015; ZHANG et al., 2017; CARRIÓN et al., 2017; CAVUTO et al., 2016; BATE et al., 2017; KUMAR et al., 2017; SAINT-PIERRE et al., 2016; SOUZA; AHN et al., 2020; PINTO, 2020). Com base na teoria da acustoelasticidade, Kleitsa et al. (2010) e Aggelis et al. (2012) estudaram a possibilidade de avaliar a tensão presente em tirantes usados para a contenção de taludes por meio de emissões de ondas ultrassônicas através da cabeça de ancoragem do tirante. Foram realizados estudos experimentais e numéricos e os autores observaram a variação na amplitude e no tempo de propagação da onda em função da tensão aplicada. Chaki e Bouse (2009) estimaram as tensões de tração em cordoalhas pré-tensionadas usando a teoria da acustoelasticidade. Dubuc, Ebrahimkhanlou e Salamone (2017) investigaram

o efeito da tensão axial em ondas longitudinais ao se propagarem em fios de cordoalhas de aço. He et al. (2018) avaliaram a distribuição de tensões em chapas de aço Q235 por meio de transdutores de ultrassom com frequência de 3 MHz. Estudos abordando o efeito acustoelástico para avaliar tensões residuais em peças de aço ou juntas soldadas também são desenvolvidos com o ultrassom (KAMYSHEV et al., 2010; TROFIMOV; MININ; TROFIMOV, 2016; ZHAN et al., 2017; JAVADI et al., 2014; UZUN; BILGE, 2011; KARABUTOV et al., 2008). Santos et al. (2009) utilizaram ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}) na avaliação de tensões residuais em roda de ferrovia. Bray e Tang (2001) também usaram as ondas L_{cr} para avaliar o efeito da tensão em placas e barras de aço. O efeito da tensão em peças de alumínio usando as ondas L_{cr} também foi estudado por Liu et. al (2018).

A possibilidade de avaliar tensões no concreto por meio das ondas ultrassônicas também vem sendo estudada com base na teoria da acustoelasticidade. Popovics e Popovics (1991) realizaram análises em cilindros de concreto submetidos a diferentes valores de tensão e usando o arranjo direto dos transdutores emitiram ondas ultrassônicas longitudinais na direção transversal à direção de aplicação do carregamento. Os autores não observaram o efeito acustoelástico e concluíram que a velocidade das ondas ultrassônicas independe do nível de tensão no material. Por outro lado, Lillamand et al. (2010) observaram a influência da tensão sobre a velocidade das ondas ultrassônicas longitudinais e de cisalhamento ao emití-las ao longo da direção do carregamento e transversalmente a ele por meio dos arranjos diretos dos transdutores. Os autores observaram que as ondas longitudinais e de cisalhamento polarizadas na direção da carga aplicada foram mais sensíveis à tensão. Bompan e Hacch (2018) chegaram na mesma conclusão ao analisar o efeito acustoelástico em prismas de concreto comprimidos uniaxialmente. Durante os ensaios, os transdutores estiveram posicionados pelo arranjo direto nas faces de extremidade e laterais dos prismas. Os autores observaram a presença de um comportamento não linear no início das curvas da variação relativa de velocidade em função da tensão. Além disto, foi verificada a necessidade da aplicação de pré-ciclos de carregamento e descarregamento antes da realização do ensaio ultrassônico para a obtenção da curva da variação relativa da velocidade das ondas ultrassônicas em função da tensão aplicada. A aplicação dos pré-ciclos garantiam que as curvas obtidas em ciclos seguintes fossem muito próximas. Um estudo mais aprofundado sobre a quantidade de pré-ciclos necessária antes da realização dos ensaios e a compreensão do que causa esta necessidade seria importante para auxiliar na elaboração de procedimentos de ensaios para o estudo do efeito acustoelástico no concreto e também para aumentar o conhecimento a respeito deste fenômeno no material.

Resende (2018), estudou a influência do dano e do efeito acustoelástico na propagação das ondas ultrassônicas em elementos de concreto comprimidos ao posicionar os transdutores em faces opostas destes elementos. No trabalho, verificou-se que o efeito acustoelástico tem uma influência muito maior sobre a variação relativa de velocidade do que a observada em ensaio, já que consegue superar a diminuição de velocidade que é causada pela fissuração do corpo de prova. Com o método de transmissão direta das ondas ultrassônicas, Larose e Hall (2009) utilizaram a Interferiometria por onda Coda e conseguiram detectar variações na velocidade relativa da onda ultrassônica da ordem de $2 \cdot 10^{-5}$ no concreto, que correspondeu à variação de tensão de 50 kPa no ensaio de compressão do cilindro. Os autores realizaram a emissão das ondas pelo método direto. Odile et al. (2011) avaliaram uma estrutura de concreto em tamanho real também usando a análise das ondas Coda. Zhang et al (2012) avaliaram a variação da velocidade das ondas com a aplicação de tensão uniaxial de tração em cilindros de concreto. Os autores posicionaram os transdutores em lados opostos da direção transversal do cilindro e aplicaram intervalos pequenos de tensão no material. Eles concluíram que a variação da velocidade das ondas neste intervalo só pôde ser precisamente obtida por conta da alta sensibilidade que a Interferiometria por Ondas Coda promove. Payan et al. (2009) emitiram ondas ultrassônicas em cilindros de concreto submetidos à compressão uniaxial pelo método direto e avaliaram a variação da velocidade das ondas em função da tensão aplicada usando o mesmo método de processamento de sinais. Também foram determinadas as constantes de Murnaghan para este material. Os resultados obtidos para l , m e n foram de - 3007 GPa, -2283 GPa e -1813 GPa, respectivamente. Nogueira (2019) também obteve estas constantes para o concreto de vigas fletidas. Além disto, o autor investigou o efeito acustelástico na região tracionada destes elementos. Para tanto, os transdutores, emissor e receptor, foram posicionados nas faces laterais opostas das vigas. Estudos sobre as constantes de Murnaghan também foram realizados com outros materiais, como o aço e o alumínio (CRECRAFT; 1967, EGGLE; BRAY, 1976; CASTELLANO et. al..2017). Spalvier et. al (2017) avaliaram a variação de velocidade das ondas em função da tensão de compressão e de tração em uma viga submetida à um ensaio de flexão usando ondas de superfície Rayleigh. Os autores utilizaram um transdutor emissor, de 50 kHz, para gerar as ondas ultrassônicas e um acelerômetro para receber as ondas ultrassônicas emitidas. Um transdutor e um acelerômetro foram posicionados alinhados na face superior da viga, para avaliar a região comprimida durante o ensaio. Na face inferior da viga, tracionada durante o ensaio, também foram posicionados um transdutor e um acelerômetros alinhados. Com isto, a análise da região tracionada da viga também foi realizada. Shokouhi, Zoega e Wiggenhauser (2010) observaram a dependência entre a velocidade de ondas

ultrassônicas e a tensão ao fixar dois transdutores de ultrassom, emissor e receptor, pelo arranjo indireto em cilindros de concreto.

Apesar dos estudos envolvendo a acustoelasticidade no concreto, ainda há muito para ser explorado. O maior conhecimento sobre o comportamento acustoelástico deste material ajuda na melhor compreensão do fenômeno, auxilia na otimização de procedimentos de ensaios para avaliá-lo e também na elaboração de procedimentos que possam ser usados futuramente para a aplicação do ultrassom na avaliação de tensões em estruturas *in situ*. Uma questão importante, ainda pouco explorada, é o estudo do efeito acustoelástico no concreto usando o método de transmissão indireta para a emissão das ondas ultrassônicas.

3. DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO E DISCUSSÕES

Neste capítulo são realizadas discussões a respeito da formulação da teoria da acustoelasticidade. O tensor constitutivo oriundo desta formulação é explicitado termo a termo e analisado. A fim de compreender melhor esta teoria, também foi apresentada uma formulação que fornece o tensor adotando apenas uma das hipóteses de Hughes e Kelly (1953). Por fim, é proposta uma formulação para a obtenção da tensão por meio do conhecimento do tensor constitutivo do material sem depender das constantes de Murnaghan l , m e n .

3.1 Variação do tensor constitutivo em função das hipóteses adotadas por Hughes e Kelly (1953)

Foi visto que a teoria da acustoelasticidade foi desenvolvida por Hughes e Kelly (1953) para um material elástico, homogêneo e isotrópico sob tensão ao adotar duas hipóteses para a energia específica de deformação do material: que os termos de terceira ordem não são desprezíveis (hipótese A) e que a medida de deformação é a de Green (hipótese B). O tensor constitutivo do material sob tensão será apresentado e suas características serão discutidas. Também foi realizado um estudo sobre o tensor constitutivo do material sob tensão adotando apenas uma das hipóteses. Este estudo contribui para a compreensão da formulação da teoria da acustoelasticidade.

O estudo foi dividido em 3 casos. No caso 1, o tensor constitutivo oriundo da adoção de ambas as hipóteses (A e B) é discutido e consiste no tensor apresentado pela teoria da acustoelasticidade. Nos casos 2 e 3, os tensores foram determinados ao considerar apenas as hipóteses B e A, respectivamente.

3.1.1 Caso 1: Tensor constitutivo de um material isotrópico sob tensão adotando as Hipóteses A e B de Hugues e Kelly

Este é o caso do tensor constitutivo obtido por meio da teoria da acustoelasticidade desenvolvida por Hughes e Kelly (1953). Foram considerados não desprezíveis os termos de terceira ordem na equação da energia específica de deformação do material, ψ , (equação 3.2), que são as parcelas contendo I_1^2 , $I_1 I_2$ e I_3 (equações 2.40 e 2.42). Também foi adotada a medida de deformação de Green, η_{ij} , (equação 3.1). Com isto, ψ é aquela proposta por Murnaghan em

1951 (equação 3.2). Ao derivar ψ em relação à η_{ij} obtém-se o segundo tensor de Piola Kirchoff (equação 3.3). Transformando este tensor no de Cauchy chega-se à equação 3.4.

$$\eta_{ij} = \alpha_{(i)} \delta_{ij} + (1 + \alpha_{(i)} + \alpha_{(j)}) \varepsilon_{ij} \quad (3.1)$$

$$\psi = \frac{(\lambda + 2G)}{2} I_1^2 - 2GI_2 + \frac{(l + 2m)}{3} I_1^3 - 2mI_1I_2 + nI_3 \quad (3.2)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial \psi}{\partial \eta_{ij}} = \left\{ \begin{array}{l} \theta \delta_{ij} (\lambda + \theta(l - m) + 2m\alpha_{(j)}) + \\ \delta_{ij} \left(2G\alpha_{(j)} + m \sum_k \alpha_k^2 \right) + \frac{1}{2} n \sum_{kl} e_{ikl} e_{jkl} \alpha_k \alpha_l + \\ \left[\delta_{kl} \delta_{ij} (\lambda + 2\theta(l - m) + 2m\alpha_{(j)}) + \right. \\ \left. 2\delta_{ij} \left(\lambda \sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} + m \sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} \right) + \right. \\ \left. n \frac{1}{2} \sum_p (e_{jpk} e_{ipl} + e_{jpl} e_{ipk}) \alpha_p + \right. \\ \left. (\delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{ki} \delta_{lj}) (G(1 + \alpha_{(i)} + \alpha_{(j)}) + m\theta) \right] \end{array} \right\} \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} \theta \delta_{ij} (\lambda + (l - m - \lambda)\theta + 2\alpha_{(j)}(m + \lambda - G)) + \\ \delta_{ij} \left(2G\alpha_{(j)} + 4G\alpha_{(j)}^2 + m \sum_k \alpha_k^2 \right) + \frac{1}{2} n \sum_{kl} e_{ikl} e_{jkl} \alpha_k \alpha_l + \\ \left[\delta_{kl} \delta_{ij} (\lambda + 2\theta(l - m - \lambda) + 2\alpha_{(j)}(m + \lambda - G)) + \right. \\ \left. 2\delta_{ij} \left(\lambda \sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} + m \sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} \right) + \right. \\ \left. n \frac{1}{2} \sum_p (e_{jpk} e_{ipl} + e_{jpl} e_{ipk}) \alpha_p + \right. \\ \left. (\delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{ki} \delta_{lj}) (2G(\alpha_{(j)} + \alpha_{(i)} + \alpha_{(l)}) + G + \theta(m + \lambda - G)) \right] \end{array} \right\} \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \quad (3.4)$$

Isolando da equação 3.4 o tensor constitutivo do material (equação 3.5), C_{ijkl} , observa-se que ele apresenta os parâmetros G , λ , l , m e n e depende das deformações do material (α). Ou seja, os valores dos elementos do tensor, C_{ijkl} , irão variar em função da deformação aplicada no material. Então, cada estado de tensão existente no material estará relacionado com o estado de deformações correspondente por meio de um tensor constitutivo diferente.

$$C_{ijkl} = \left[\begin{aligned} & \delta_{kl} \delta_{ij} (\lambda + 2\theta(l - m - \lambda) + 2\alpha_{(j)}(m + \lambda - G) + \\ & 2\delta_{ij} \left(\lambda \sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} + m \sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} \right) + \\ & n \frac{1}{2} \sum_p (e_{jpk} e_{ipl} + e_{jpl} e_{ipk}) \alpha_p + \\ & (\delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{ki} \delta_{lj}) (2G(\alpha_{(j)} + \alpha_{(i)} + \alpha_{(l)}) + G + \theta(m + \lambda - G)) \end{aligned} \right] \quad (3.5)$$

O tensor C_{ijkl} anisotrópico completo, ou seja, com 81 elementos, está apresentado na equação 3.6, que representa a equação constitutiva do material (equação 3.7). Com base na equação 3.5, foram desenvolvidas as expressões para cada termo do tensor C_{ijkl} sem considerar que existe simetria do mesmo, o que resultou nas equações 3.8 a 3.22.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1132} & C_{1113} & C_{1131} & C_{1112} & C_{1121} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2232} & C_{2213} & C_{2231} & C_{2212} & C_{2221} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3332} & C_{3313} & C_{3331} & C_{3312} & C_{3321} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2332} & C_{2313} & C_{2331} & C_{2312} & C_{2321} \\ C_{3211} & C_{3222} & C_{3233} & C_{3223} & C_{3232} & C_{3213} & C_{3231} & C_{3212} & C_{3221} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1332} & C_{1313} & C_{1331} & C_{1312} & C_{1321} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3132} & C_{3113} & C_{3131} & C_{3112} & C_{3121} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1232} & C_{1213} & C_{1231} & C_{1212} & C_{1221} \\ C_{2111} & C_{2122} & C_{2133} & C_{2123} & C_{2132} & C_{2113} & C_{2131} & C_{2112} & C_{2121} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{22} \\ \alpha_{33} \\ \alpha_{23} \\ \alpha_{32} \\ \alpha_{13} \\ \alpha_{31} \\ \alpha_{12} \\ \alpha_{21} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \alpha_{kl} \quad (3.7)$$

$$C_{1111} = \lambda + 2\theta(l - G) + 2G + \alpha_1(4m + 4\lambda + 10G) \quad (3.8)$$

$$C_{2222} = \lambda + 2\theta(l - G) + 2G + \alpha_2(4m + 4\lambda + 10G) \quad (3.9)$$

$$C_{3333} = \lambda + 2\theta(l - G) + 2G + \alpha_3(4m + 4\lambda + 10G) \quad (3.10)$$

$$C_{1212} = C_{2112} = \theta(m + \lambda - G) + G + 2G(\alpha_1 + 2\alpha_2) - \frac{1}{2} n \alpha_3 \quad (3.11)$$

$$C_{1221} = C_{2121} = \theta(m + \lambda - G) + G + 2G(2\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{1}{2} n \alpha_3 \quad (3.12)$$

$$C_{2323} = C_{3223} = \theta(m + \lambda - G) + G + 2G(\alpha_2 + 2\alpha_3) - \frac{1}{2} n \alpha_1 \quad (3.13)$$

$$C_{2332} = C_{3232} = \theta(m + \lambda - G) + G + 2G(2\alpha_2 + \alpha_3) - \frac{1}{2} n \alpha_1 \quad (3.14)$$

$$C_{3131} = C_{1331} = \theta(m + \lambda - G) + G + 2G(\alpha_3 + 2\alpha_1) - \frac{1}{2} n \alpha_2 \quad (3.15)$$

$$C_{1313} = C_{3113} = \theta(m + \lambda - G) + G + 2G(2\alpha_3 + \alpha_1) - \frac{1}{2}n\alpha_2 \quad (3.16)$$

$$C_{1122} = \lambda + 2\theta(l - m - \lambda) + 2\alpha_1(m + \lambda - G) + 2\alpha_2(\lambda + m) + n\alpha_3 \quad (3.17)$$

$$C_{2211} = \lambda + 2\theta(l - m - \lambda) + 2\alpha_2(m + \lambda - G) + 2\alpha_1(\lambda + m) + n\alpha_3 \quad (3.18)$$

$$C_{1133} = \lambda + 2\theta(l - m - \lambda) + 2\alpha_1(m + \lambda - G) + 2\alpha_3(\lambda + m) + n\alpha_2 \quad (3.19)$$

$$C_{3311} = \lambda + 2\theta(l - m - \lambda) + 2\alpha_3(m + \lambda - G) + 2\alpha_1(\lambda + m) + n\alpha_2 \quad (3.20)$$

$$C_{2233} = \lambda + 2\theta(l - m - \lambda) + 2\alpha_2(m + \lambda - G) + 2\alpha_3(\lambda + m) + n\alpha_1 \quad (3.21)$$

$$C_{3322} = \lambda + 2\theta(l - m - \lambda) + 2\alpha_3(m + \lambda - G) + 2\alpha_2(\lambda + m) + n\alpha_1 \quad (3.22)$$

A equação 3.23 mostra os termos nulos do tensor C_{ijkl} . Por meio dela, observou-se que tensões normais, não geram deformações de cisalhamento, já que os termos destacados no quadro em vermelho são nulos. Além disto, tensões de cisalhamento não geram deformações normais, pois, os termos destacados no quadro em azul resultaram nulos. Por fim, verificou-se que tensões de cisalhamento num plano não geram deformações de cisalhamento num plano diferente, pois, os termos destacados no quadro em amarelo são nulos. Então, o tensor possui 21 termos não nulos, cujas expressões estão descritas pelas equações 3.8 a 3.22.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{2323} & C_{2332} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{3223} & C_{3232} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1313} & C_{1331} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{3113} & C_{3131} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} & C_{1221} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{2112} & C_{2121} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{22} \\ \alpha_{33} \\ \alpha_{23} \\ \alpha_{32} \\ \alpha_{13} \\ \alpha_{31} \\ \alpha_{12} \\ \alpha_{21} \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

Para saber quais elementos do tensor C_{ijkl} , descritos pelas equações 3.8 à 3.22, são iguais, é necessário supor uma direção de aplicação de tensão normal no sólido. Ao admitir que a tensão está aplicada na direção do eixo 1, tem-se que esta tensão é σ_{11} e que as deformações geradas são α_{11} e $\alpha_{22} = \alpha_{33}$. Substituindo estes valores de deformação nas equações 3.8 à 3.22, as igualdades entre os elementos do tensor ficam descritas pelas equações 3.24 à 3.34 e o tensor passa a ser representado como na equação 3.35. Nesta, os elementos destacados nos quadros de

mesma cor são iguais. Por meio das equações 3.25, 3.27, 3.30 e 3.31, verifica-se que o tensor C_{ijkl} não é simétrico.

$$C_{2222} = C_{3333} \quad (3.24)$$

$$C_{1212} = C_{2112} \neq C_{1221} = C_{2121} \quad (3.25)$$

$$C_{2323} = C_{3223} = C_{2332} = C_{3232} \quad (3.26)$$

$$C_{3131} = C_{1331} \neq C_{1313} = C_{3113} \quad (3.27)$$

$$C_{1212} = C_{2112} = C_{1313} = C_{3113} \quad (3.28)$$

$$C_{1221} = C_{2121} = C_{3131} = C_{1331} \quad (3.29)$$

$$C_{1122} \neq C_{2211} \quad (3.30)$$

$$C_{1133} \neq C_{3311} \quad (3.31)$$

$$C_{2233} = C_{3322} \quad (3.32)$$

$$C_{1122} = C_{1133} \quad (3.33)$$

$$C_{2211} = C_{3311} \quad (3.34)$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1122} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{2211} & C_{2233} & C_{2222} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{2323} & C_{2323} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{2323} & C_{2323} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} & C_{1221} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} & C_{1221} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} & C_{1221} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} & C_{1221} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{22} \\ \alpha_{33} \\ \alpha_{23} \\ \alpha_{32} \\ \alpha_{13} \\ \alpha_{31} \\ \alpha_{12} \\ \alpha_{21} \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

Por causa da simetria dos tensores σ_{ij} ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$) e α_{ij} ($\alpha_{ij} = \alpha_{ji}$), o tensor C_{ijkl} da equação 3.35 pode ser simplificado para um tensor 6x6 (equação 3.36). Portanto, C_{ijkl} apresenta 12 componentes não nulas e 8 elementos independentes, que são: C_{1111} , C_{2222} , C_{2323} , C_{1212} , C_{1221} , C_{1122} , C_{2233} e C_{2211} .

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1122} & 0 & 0 & 0 \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ C_{2211} & C_{2233} & C_{2222} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2C_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} + C_{1221} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} + C_{1221} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{22} \\ \alpha_{33} \\ \alpha_{23} \\ \alpha_{13} \\ \alpha_{12} \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

Ao admitir que a tensão está aplicada na direção do eixo 2 ou na direção do eixo 3, a forma do tensor constitutivo será a mesma que a apresentada na (equação 3.36).

Por meio deste estudo, verificou-se que o equacionamento de Hugues e Kelly (1953) mostra que o tensor C_{ijkl} resultante da aplicação da tensão normal num material isotrópico é anisotrópico e não simétrico. O tensor constitutivo é não simétrico, pois utiliza a transformação (linearizada) da deformação de Green para a configuração atual (equação 2.38) utilizando a relação 2.36. Assim, o tensor constitutivo possui como resultado tensão na configuração inicial, mas argumentos na configuração atual.

Pelo fato de o tensor C_{ijkl} do material sob tensão ser anisotrópico, as propriedades do material são diferentes em diferentes direções do sólido quando este está submetido à um determinado valor de tensão. Como as velocidades das ondas ultrassônicas dependem das propriedades do material, estas velocidades são dependentes da direção de propagação da onda ultrassônica quando existe tensão aplicada no sólido. Além disto, por ser dependente das deformações do material, o tensor constitutivo será diferente para diferentes estados de tensão do material. Isto explica porque um mesmo tipo de onda ultrassônica emitida numa mesma direção do sólido tem sua velocidade alterada ao mudar o estado de tensão do material. Observa-se nas equações 3.8 a 3.22 que, se não houver tensão aplicada no sólido, as deformações são nulas e o tensor resultante é o do material isotrópico. Portanto, a aplicação de tensão num material isotrópico o torna anisotrópico, resultando em velocidades de ondas ultrassônicas dependentes da direção de propagação no sólido.

3.1.2 Caso 2: Tensor constitutivo de um material isotrópico sob tensão adotando apenas a Hipótese B de Hugues e Kelly

Neste caso, o tensor constitutivo foi obtido considerando desprezíveis os termos de terceira ordem da equação de energia específica de deformação do material (equação 3.2) e ao adotar a medida de deformação de Green (equação 3.1). Com isto, ψ fica apresentada pela

equação 3.37. Ao derivar ψ em relação à η_{ij} , obtêm-se o segundo tensor de Piola Kirchoff (equação 3.38), S_{ij} . O tensor de Cauchy (equação 3.39), σ_{ij} , é obtido a partir de S_{ij} por meio da equação 2.44. Assim como ocorre com o tensor de Cauchy da teoria da acustoelasticidade (caso 1), o tensor de Cauchy do caso 2 também é representado por duas parcelas, de acordo com a equação 3.40. Nesta, σ_{ij}^0 , é a tensão previamente aplicada no material e $C_{ijkl} \frac{\partial U_k}{\partial x_l}$ é a tensão gerada quando as ondas ultrassônicas se propagam no elemento previamente carregado. A equação 3.41 mostra apenas o tensor constitutivo do material, C_{ijkl} , contido na equação 3.39. Observou-se que C_{ijkl} depende das deformações do material. Ou seja, mesmo que seja adotada apenas a hipótese B (deformação de Green) na equação de energia específica do material, as equações de velocidade das ondas ultrassônicas ainda irão depender do estado de tensão deste material. Observou-se também que o tensor constitutivo não possui mais os parâmetros l , m e n . Isto ocorreu pelo fato de os termos de terceira ordem terem sido desprezados na equação de ψ .

$$\psi = \frac{(\lambda + 2G)}{2} I_1^2 - 2GI_2 \quad (3.37)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial \psi}{\partial \eta_{ij}} = \left\{ \begin{array}{l} \lambda \delta_{ij} \theta + 2G \alpha_{(j)} \delta_{ij} + \\ \left[\lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + 2\lambda \delta_{ij} \left(\sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} \right) + \right] \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \\ \left[G(\delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{ki} \delta_{lj}) (1 + \alpha_{(j)} + \alpha_{(i)}) \right] \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \end{array} \right\} \quad (3.38)$$

$$\sigma_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} \theta \delta_{ij} (\lambda + 2\alpha_{(j)} (\lambda - G) - \theta \lambda) + \delta_{ij} (2G \alpha_{(j)} + 4G \alpha_{(j)}^2) + \\ \left[\delta_{ij} \delta_{kl} (\lambda + 2\lambda \alpha_{(j)} + 2\theta \lambda - 2G \alpha_{(j)}) + 2\lambda \delta_{ij} \left(\sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} \right) + \right] \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \\ \left[(\delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{ki} \delta_{lj}) (2G(\alpha_{(j)} + \alpha_{(i)} + \alpha_{(l)}) + G + \theta \lambda - \theta G) \right] \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \end{array} \right\} \quad (3.39)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + C_{ijkl} \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \quad (3.40)$$

$$C_{ijkl} = \left[\begin{array}{l} \delta_{ij} \delta_{kl} (\lambda + 2\lambda \alpha_{(j)} + 2\theta \lambda - 2G \alpha_{(j)}) + 2\lambda \delta_{ij} \left(\sum_m \alpha_m \delta_{mk} \delta_{ml} \right) + \\ (\delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{ki} \delta_{lj}) (2G(\alpha_{(j)} + \alpha_{(i)} + \alpha_{(l)}) + G + \theta \lambda - \theta G) \end{array} \right] \quad (3.41)$$

As expressões para cada elemento do tensor constitutivo foram desenvolvidas com base na equação 3.41 e estão apresentadas nas equações 3.42 à 3.56. O tensor constitutivo fica, então,

representado pela equação 3.23, como no caso 1. Este tensor é anisotrópico e possui 21 termos não nulos.

$$C_{1111} = \lambda + 2G - 2\theta G + \alpha_1(4\lambda + 10G) \quad (3.42)$$

$$C_{2222} = \lambda + 2G - 2\theta G + \alpha_2(4\lambda + 10G) \quad (3.43)$$

$$C_{3333} = \lambda + 2G - 2\theta G + \alpha_3(4\lambda + 10G) \quad (3.44)$$

$$C_{1212} = C_{2112} = \theta(\lambda - G) + G + 2G(\alpha_1 + 2\alpha_2) \quad (3.45)$$

$$C_{1221} = C_{2121} = \theta(\lambda - G) + G + 2G(2\alpha_1 + \alpha_2) \quad (3.46)$$

$$C_{2323} = C_{3223} = \theta(\lambda - G) + G + 2G(\alpha_2 + 2\alpha_3) \quad (3.47)$$

$$C_{2332} = C_{3232} = \theta(\lambda - G) + G + 2G(2\alpha_2 + \alpha_3) \quad (3.48)$$

$$C_{3131} = C_{1331} = \theta(\lambda - G) + G + 2G(\alpha_3 + 2\alpha_1) \quad (3.49)$$

$$C_{1313} = C_{3113} = \theta(\lambda - G) + G + 2G(2\alpha_3 + \alpha_1) \quad (3.50)$$

$$C_{1122} = \lambda - 2\theta\lambda + 2\alpha_1(\lambda - G) + 2\alpha_2\lambda \quad (3.51)$$

$$C_{2211} = \lambda - 2\theta\lambda + 2\alpha_2(\lambda - G) + 2\alpha_1\lambda \quad (3.52)$$

$$C_{1133} = \lambda - 2\theta\lambda + 2\alpha_1(\lambda - G) + 2\alpha_3\lambda \quad (3.53)$$

$$C_{3311} = \lambda - 2\theta\lambda + 2\alpha_3(\lambda - G) + 2\alpha_1\lambda \quad (3.54)$$

$$C_{2233} = \lambda - 2\theta\lambda + 2\alpha_2(\lambda - G) + 2\alpha_3\lambda \quad (3.55)$$

$$C_{3322} = \lambda - 2\theta\lambda + 2\alpha_3(\lambda - G) + 2\alpha_2\lambda \quad (3.56)$$

Admitindo que a tensão normal está aplicada na direção do eixo 1 do sólido, esta tensão é denominada σ_{11} e as deformações geradas no material são α_{11} e $\alpha_{22} = \alpha_{33}$. Ao substituir estes valores de deformação nas equações 3.42 à 3.56, os elementos iguais do tensor C_{ijkl} ficam descritos pelas equações 3.24 à 3.34, como no caso 1. Portanto, as equações 3.25, 3.27, 3.30 e 3.31 mostram que o tensor constitutivo para o caso 2 também não é simétrico. Este tensor é representado na equação 3.35 e pode ser simplificado como na equação 3.36 ao considerar a simetria dos tensores σ_{ij} e α_{ij} .

Foi visto que, ao adotar apenas a hipótese B, o tensor constitutivo resultante da aplicação de tensão normal num material isotrópico é anisotrópico e não simétrico, é função das deformações do material e não apresenta os parâmetros l , m e n . Por meio das equações 3.42 à 3.56 observou-se que, quando não houver tensão aplicada no sólido, as deformações serão nulas e o tensor resultante será o do material isotrópico. Por ser dependente das deformações, o tensor C_{ijkl} irá variar conforme o estado de deformações (ou de tensões) do material variar. Portanto,

o tensor constitutivo para o caso 2 também mostra a dependência existente entre a velocidade das ondas ultrassônicas e o estado de tensões do material.

3.1.3 Caso 3: Tensor constitutivo de um material isotrópico sob tensão adotando apenas a Hipótese A de Hugues e Kelly

Neste caso, o tensor constitutivo foi determinado ao considerar não desprezíveis os termos de terceira ordem da equação de energia específica de deformação e ao adotar a medida de deformação de engenharia, ε_{ij} . Assim, ψ ficou descrita pela equação 3.57. Nesta equação, os invariantes de deformação são funções de ε_{ij} (equações 3.58, 3.59 e 3.60), que está apresentado na equação 3.61. A posição inicial é a_i e a atual, x_i , dada pela equação 3.62. Nesta, $A_{(i)}a_i$ é o deslocamento gerado pela aplicação do carregamento prévio e $U_i(a)$ é o deslocamento gerado pela emissão das ondas ultrassônicas no material previamente carregado. O deslocamento (u_i) é dado pela equação 3.63. Ao realizar manipulações matemáticas, a equação 3.61 passa a ser descrita pela equação 3.64. Nesta, o termo $(A_{(i)} - 1)$ foi denominado $\beta_{(i)}$ (equação 3.65) e o termo $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$ foi denominado ξ_{ij} (equação 3.66). $\beta_{(i)}$ é a deformação previamente aplicada no material na direção dos eixos principais e ξ_{ij} é a deformação gerada pela propagação das ondas no material previamente carregado com $\xi_{ij} \ll \beta_{(i)}$. Assim, a deformação no material, ε_{ij} , fica descrita como na equação 3.67.

$$\psi = \frac{(\lambda + 2G)}{2} I_1^2 - 2GI_2 + \frac{(l + 2m)}{3} I_1^3 - 2mI_1I_2 + nI_3 \quad (3.57)$$

$$I_1 = \varepsilon_{ii} \quad (3.58)$$

$$I_2 = \frac{\varepsilon_{ii}\varepsilon_{jj} - \varepsilon_{ij}\varepsilon_{ji}}{2} \quad (3.59)$$

$$I_3 = e_{ijk}\varepsilon_{1i}\varepsilon_{2j}\varepsilon_{3k} \quad (3.60)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial a_j} + \frac{\partial u_j}{\partial a_i} \right) \quad (3.61)$$

$$x_i = A_{(i)}a_i + U_i(a) \quad (3.62)$$

$$u_i = x_i - a_i = (A_{(i)} - 1)a_i + U_i(a) \quad (3.63)$$

$$\varepsilon_{ij} = (A_{(i)} - 1)\delta_{ij} + \frac{A_j A_i}{2} \left(\frac{\partial U_i}{dx_j} + \frac{\partial U_j}{dx_i} \right) \quad (3.64)$$

$$\beta_{(i)} = (A_{(i)} - 1) \rightarrow A_{(i)} = \beta_{(i)} + 1 \quad (3.65)$$

$$\xi_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{dx_j} + \frac{\partial U_j}{dx_i} \right) \quad (3.66)$$

$$\varepsilon_{ij} = \beta_{(i)}\delta_{ij} + (1 + \beta_{(i)} + \beta_{(j)})\xi_{ij} \quad (3.67)$$

Ao derivar ψ (equação 3.57) em relação à ε_{ij} , obtêm-se diretamente o tensor de tensão de Cauchy (equação 3.68), σ_{ij} . Foram desprezados os termos: ξ^n com $n > 1$, $\xi\beta^n$, com $n > 1$ e β^n , com $n > 2$. O tensor σ_{ij} também pode ser representado por duas parcelas como na equação 3.40. O tensor constitutivo C_{ijkl} , contido na equação 3.68, é apresentado na equação 3.69.

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_{ij}} = \left\{ \begin{array}{l} \theta \delta_{ij} (\lambda + \theta(l - m) + 2m\beta_{(j)}) + \\ \delta_{ij} \left(2G\beta_{(j)} + m \sum_k \beta_k^2 \right) + \frac{1}{2} n \sum_{kl} e_{ikl} e_{jkl} \beta_k \beta_l + \\ \left[\delta_{kl} \delta_{ij} (\lambda + 2\theta(l - m) + 2m\beta_{(j)}) + \right. \\ \left. 2\delta_{ij} \left(\lambda \sum_m \beta_m \delta_{mk} \delta_{ml} + m \sum_m \beta_m \delta_{mk} \delta_{ml} \right) + \right. \\ \left. n \frac{1}{2} \sum_p (e_{jpk} e_{ipl} + e_{jpl} e_{ipk}) \beta_p + \right. \\ \left. (\delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{ki} \delta_{lj}) (G(1 + \beta_{(i)} + \beta_{(j)}) + m\theta) \right] \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \end{array} \right\} \quad (3.68)$$

$$C_{ijkl} = \left[\begin{array}{l} \delta_{kl} \delta_{ij} (\lambda + 2\theta(l - m) + 2m\beta_{(j)}) + \\ 2\delta_{ij} \left(\lambda \sum_m \beta_m \delta_{mk} \delta_{ml} + m \sum_m \beta_m \delta_{mk} \delta_{ml} \right) + \\ n \frac{1}{2} \sum_p (e_{jpk} e_{ipl} + e_{jpl} e_{ipk}) \beta_p + \\ (\delta_{kj} \delta_{li} + \delta_{ki} \delta_{lj}) (G(1 + \beta_{(i)} + \beta_{(j)}) + m\theta) \end{array} \right] \quad (3.69)$$

As expressões para os elementos do tensor C_{ijkl} foram desenvolvidas com base na equação 3.69 e estão apresentadas nas equações 3.70 à 3.81. A equação 3.23 mostra os elementos nulos deste tensor. Observou-se que o tensor constitutivo do caso 3 depende das deformações do material e contém os parâmetros l , m e n , uma vez que os termos de terceira ordem da equação de energia específica de deformação não foram desprezados.

$$C_{1111} = \lambda + 2\theta l + 2G + \beta_1(4m + 2\lambda + 4G) \quad (3.70)$$

$$C_{2222} = \lambda + 2\theta l + 2G + \beta_2(4m + 2\lambda + 4G) \quad (3.71)$$

$$C_{3333} = \lambda + 2\theta l + 2G + \beta_3(4m + 2\lambda + 4G) \quad (3.72)$$

$$C_{1212} = C_{2112} = C_{1221} = C_{2121} = \theta m + G(1 + \beta_1 + \beta_2) - \frac{1}{2}n\beta_3 \quad (3.73)$$

$$C_{2323} = C_{3223} = C_{2332} = C_{3232} = \theta m + G(1 + \beta_2 + \beta_3) - \frac{1}{2}n\beta_1 \quad (3.74)$$

$$C_{3131} = C_{1331} = C_{1313} = C_{3113} = \theta m + G(1 + \beta_3 + \beta_1) - \frac{1}{2}n\beta_2 \quad (3.75)$$

$$C_{1122} = \lambda + 2\theta(l - m) + 2m\beta_1 + 2\beta_2(\lambda + m) + n\beta_3 \quad (3.76)$$

$$C_{2211} = \lambda + 2\theta(l - m) + 2m\beta_2 + 2\beta_1(\lambda + m) + n\beta_3 \quad (3.77)$$

$$C_{1133} = \lambda + 2\theta(l - m) + 2m\beta_1 + 2\beta_3(\lambda + m) + n\beta_2 \quad (3.78)$$

$$C_{3311} = \lambda + 2\theta(l - m) + 2m\beta_3 + 2\beta_1(\lambda + m) + n\beta_2 \quad (3.79)$$

$$C_{2233} = \lambda + 2\theta(l - m) + 2m\beta_2 + 2\beta_3(\lambda + m) + n\beta_1 \quad (3.80)$$

$$C_{3322} = \lambda + 2\theta(l - m) + 2m\beta_3 + 2\beta_2(\lambda + m) + n\beta_1 \quad (3.81)$$

Ao admitir que a tensão normal está aplicada na direção do eixo 1 do sólido, σ_{11} , as deformações geradas são β_{11} e $\beta_{22} = \beta_{33}$. Substituindo estas deformações nas equações 3.70 à 3.81, tem-se que a igualdade entre os elementos do tensor C_{ijkl} é descrita pelas equações 3.82 à 3.89. Deste modo, C_{ijkl} do caso 3 pode ser apresentado como na equação 3.90. Nesta, os elementos iguais estão destacados nos quadros de mesma cor. As equações 3.85 e 3.86 mostram que o tensor constitutivo do caso 3 também não é simétrico.

$$C_{2222} = C_{3333} \quad (3.82)$$

$$C_{1212} = C_{2112} = C_{1221} = C_{2121} = C_{3131} = C_{1331} = C_{1313} = C_{3113} \quad (3.83)$$

$$C_{2323} = C_{3223} = C_{2332} = C_{3232} \quad (3.84)$$

$$C_{1122} \neq C_{2211} \quad (3.85)$$

$$C_{1133} \neq C_{3311} \quad (3.86)$$

$$C_{2233} = C_{3322} \quad (3.87)$$

$$C_{1122} = C_{1133} \quad (3.88)$$

$$C_{2211} = C_{3311} \quad (3.89)$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1122} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{2211} & C_{2233} & C_{2222} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{2323} & C_{2323} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{2323} & C_{2323} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} & C_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} & C_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} & C_{1212} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} & C_{1212} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{22} \\ \beta_{33} \\ \beta_{23} \\ \beta_{32} \\ \beta_{13} \\ \beta_{31} \\ \beta_{12} \\ \beta_{21} \end{pmatrix} \quad (3.90)$$

Considerando a simetria dos tensores σ_{ij} e β_{ij} , o tensor C_{ijkl} pode ser simplificado para um tensor 6×6 , conforme equação 3.91. Portanto, o tensor constitutivo apresenta 12 componentes não nulas e 7 elementos independentes, que são: C_{1111} , C_{2222} , C_{2323} , C_{1212} , C_{1122} , C_{2211} e C_{2233} .

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1122} & 0 & 0 & 0 \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ C_{2211} & C_{2233} & C_{2222} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2C_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_{1212} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_{1212} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{22} \\ \beta_{33} \\ \beta_{23} \\ \beta_{13} \\ \beta_{12} \end{pmatrix} \quad (3.91)$$

Ao admitir que a tensão normal está aplicada na direção do eixo 2 ou na direção do eixo 3, a forma do tensor C_{ijkl} é a mesma apresentada na equação equação 3.91.

No caso 3, também foi observado por meio das equações 3.70 à 3.81 que, se não existir tensão aplicada no material, as deformações são nulas e o tensor resultante é o do material isotrópico. Portanto, ao adotar apenas a hipótese A de Hugues e Kelly, o tensor constitutivo resultante da aplicação de tensão normal num material isotrópico é anisotrópico, sem simetria e dependente das deformações. Ou seja, mesmo que seja adotada apenas a hipótese A na equação de energia específica do material, as equações de velocidade das ondas ultrassônicas ainda irão depender do estado de tensão deste material.

3.1.4 Resumo

O equacionamento da teoria da acustoelasticidade mostra que o tensor constitutivo resultante da aplicação de tensão num material isotrópico é anisotrópico, dependente das deformações e não simétrico. Este estudo permitiu verificar que é possível obter um tensor constitutivo dependente das deformações ao adotar apenas uma das hipóteses de Hughes e Kelly (A ou B). Portanto, a consideração de apenas uma delas já mostra a dependência entre as velocidades das ondas e a tensão aplicada no material.

3.2 Proposta de uma formulação para o tensor constitutivo em função da tensão aplicada sem depender das constantes l , m e n

Foi proposta uma formulação, a partir da qual, se tem uma abordagem diferente para a avaliação de tensões num material usando o ultrassom: relacionar o tensor constitutivo com a tensão aplicada no material sem que para isto seja necessário adicionar termos de terceira ordem na equação de energia específica do material ou usar a medida de deformação de Green. Com isto, a formulação proposta não depende das constantes de Murnaghan (l , m e n).

Por meio da teoria da acustoelasticidade, Hugues e Kelly (1953) mostraram que o tensor constitutivo C_{ijkl} resultante da aplicação de tensão num material isotrópico é anisotrópico e não simétrico. Ou seja, quando se aplica tensão num material isotrópico, ele se torna anisotrópico e a simetria do tensor C_{ijkl} deixa de existir. Com base neste conhecimento, foram desenvolvidas equações para a propagação das ondas ultrassônicas num meio anisotrópico sem tensão considerando o tensor C_{ijkl} não simétrico. As equações resultantes relacionaram a velocidade de propagação das ondas no material com o tensor constitutivo. Este equacionamento foi baseado em um já existente da teoria da elasticidade para a propagação das ondas em meio anisotrópico sem tensão, mas com simetria do tensor constitutivo (Ortega, 2011).

Sabe-se por meio de ensaios experimentais que, diferentes níveis de tensão aplicada no material resultam em diferentes valores de velocidade de propagação das ondas no meio (LILLAMAND et al., 2010; BOMPAN; HAACH, 2018; RESENDE, 2018). Consequentemente, o tensor constitutivo obtido por meio destas velocidades ao usar as equações desenvolvidas para o material anisotrópico (sem simetria do tensor constitutivo), também irão variar. Ensaios experimentais mostram que a variação relativa de velocidade das ondas é função da tensão, conforme a equação 3.92 (BOMPAN; HAACH, 2018).

$$\frac{\Delta V}{V_{ij}^0} = \frac{V_{ij}^\sigma - V_{ij}^0}{V_{ij}^0} = f(\sigma) \quad (3.92)$$

As equações de velocidade determinadas para o material anisotrópico sem simetria do tensor constitutivo foram inseridas na equação 3.92. Com isto, foi obtida uma equação que relaciona o tensor constitutivo com a tensão aplicada no material. Por meio dela, a tensão poderia ser obtida conhecendo-se um elemento do tensor constitutivo. Esta é uma formulação que não depende de constantes elásticas adicionais (l, m e n). As constantes elásticas do material são aquelas já conhecidas da teoria da elasticidade (E e ν). Apenas é considerado que os elementos do tensor constitutivo são variáveis com a tensão.

3.2.1 Propagação das ondas ultrassônicas em meio elástico, homogêneo, anisotrópico (sem simetria do tensor C_{ijkl}) e sem tensão

A determinação das equações das velocidades das ondas ultrassônicas ao se propagarem num meio é realizada a partir da equação do movimento (equação 3.93). Nesta equação, σ_{ij} é o tensor de tensões de Cauchy, que é representado pela Lei de Hooke generalizada, conforme equação 3.94. Substituindo a equação da deformação de engenharia, 3.95, na equação 3.94, tem-se a lei de Hooke generalizada em função dos deslocamentos e do tensor constitutivo C_{ijkl} (equação 3.96). Ao substituir a equação da tensão (equação 3.96) na equação do movimento (equação 3.93) chega-se à equação do movimento em termos de deslocamentos (equação 3.97). As deduções apresentadas neste item partem do pressuposto da equação de movimento (equação 3.97) ser escrita a partir de uma configuração atual estática (corpo de prova tensionado). Assim, entenda-se nas equações que a tensão de Cauchy, a deformação e os deslocamentos associados são, na realidade, suas taxas. Sabe-se que nessas condições a tensão de Cauchy é não conservativa e, portanto, matriz constitutiva tangente é não simétrica (Ogden 1984).

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (3.93)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (3.94)$$

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (3.95)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{2} C_{ijkl} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (3.96)$$

$$\frac{1}{2} C_{ijkl} \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} + \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (3.97)$$

A função u na equação 3.97 representa os deslocamentos das partículas do meio causado pela propagação das ondas. A expressão que pode ser admitida para este deslocamento é a equação de propagação de ondas harmônicas planas (equação 3.98). Nesta equação, A é a amplitude da onda; t é o tempo; ω é a frequência angular; α_i são os cossenos diretores do versor α localizado na direção de deslocamento das partículas, ou seja, na direção da polarização da onda; k_j pode ser definido como na equação 3.99, na qual, k é uma constante que representa o número de onda (equação 3.100) e n_j são os cossenos diretores do versor n , que é perpendicular à frente de onda. Ou seja, o versor n está na direção de propagação da onda. O número de onda indica quantos comprimentos de onda existem numa determinada distância. Então, k_j indica qual é este número na direção de propagação da onda.

$$u(x_j, t) = A \alpha_i \exp[i(k_j x_j - \omega t)] \quad (3.98)$$

$$k_j = k n_j \quad (3.99)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.100)$$

Ao substituir a equação dos deslocamentos (equação 3.98) na equação de movimento (equação 3.97), deverão ser realizadas derivadas da função de deslocamentos, apresentadas nas equações 3.101 à 3.103. A equação de movimento resultante é a apresentada pela equação 3.104. Com base na equação 3.99, serão feitas as seguintes substituições na equação 3.104: $k_j = k n_j$, $k_l = k n_l$, $k_k = k n_k$. Além disto, na equação 3.104, os índices em u serão uniformizados ficando todos como u_l a fim de fatorar a expressão deixando o termo u_l em evidência. Para se alterar os índices de u , será realizada a seguinte operação usando o delta de kronecker: $u_i = \delta_{il} u_l$, $u_k = \delta_{kl} u_l$. Observa-se nestas expressões que u_i e u_k só existirão (não serão nulos) quando $i=l$ e $k=l$, respectivamente. Por fim, sabendo-se que $\omega = 2\pi f$ e $f = V/\lambda$, a velocidade angular pode ser reescrita como $\omega = 2\pi V/\lambda$. Substituindo a equação 3.100 nesta expressão, tem-se que $\omega = kV$. Com isto, a equação do movimento se torna a 3.105. Nesta equação, $n_l \delta_{kl} = n_k$. Portanto, a equação de movimento fica representada pela equação 3.106.

$$\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} = -k_j k_l u_k \quad (3.101)$$

$$\frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} = -k_j k_k u_l \quad (3.102)$$

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = -\omega^2 u_i \quad (3.103)$$

$$\frac{1}{2} C_{ijkl} (k_j k_l u_k + k_j k_k u_l) = \rho \omega^2 u_i \quad (3.104)$$

$$\left[\frac{1}{2} (C_{ijkl} n_j n_l \delta_{kl} + C_{ijkl} n_j n_k) - \rho V^2 \delta_{il} \right] u_l = 0 \quad (3.105)$$

$$(C_{ijkl} n_j n_k - \rho V^2 \delta_{il}) u_l = 0 \quad (3.106)$$

Na equação 3.106, o termo $C_{ijkl} n_j n_k$ resulta no tensor G_{il} . Assim, a equação do movimento fica descrita pela equação 3.107, que é chamada de “equação de Christoffel” (Ortega, et al., 2011). Nela, G_{il} é o tensor de Christoffel.

$$(G_{il} - \rho V^2 \delta_{il}) u_l = 0 \quad (3.107)$$

O desenvolvimento do tensor $G_{il} = C_{ijkl} n_j n_k$ é realizado primeiramente efetuando a soma em relação aos índices repetidos j e k (equação 3.108). A expansão desta equação gera 9 expressões para G_{il} , conforme equação 3.109. Observe que a consideração de não simetria do tensor C_{ijkl} torna o tensor G_{il} não simétrico também, ou seja $G_{il} \neq G_{li}$.

$$\begin{aligned} G_{il} = & C_{i11l} n_1 n_1 + C_{i12l} n_1 n_2 + C_{i13l} n_1 n_3 + \\ & C_{i21l} n_2 n_1 + C_{i22l} n_2 n_2 + C_{i23l} n_2 n_3 + \\ & C_{i31l} n_3 n_1 + C_{i32l} n_3 n_2 + C_{i33l} n_3 n_3 \end{aligned} \quad (3.108)$$

$$\begin{aligned} G_{11} = & C_{1111} n_1 n_1 + C_{1221} n_2 n_2 + C_{1331} n_3 n_3 \\ G_{22} = & C_{2112} n_1 n_1 + C_{2222} n_2 n_2 + C_{2332} n_3 n_3 \\ G_{33} = & C_{3113} n_1 n_1 + C_{3223} n_2 n_2 + C_{3333} n_3 n_3 \\ G_{23} = & (C_{2233} + C_{2323}) n_2 n_3 \\ G_{32} = & (C_{3232} + C_{3322}) n_2 n_3 \\ G_{13} = & (C_{1133} + C_{1313}) n_1 n_3 \\ G_{31} = & (C_{3131} + C_{3311}) n_1 n_3 \\ G_{12} = & (C_{1122} + C_{1212}) n_1 n_2 \\ G_{21} = & (C_{2121} + C_{2211}) n_1 n_2 \end{aligned} \quad (3.109)$$

As expressões para os 9 elementos de G_{il} , descritas na equação 3.109, foram organizadas por meio da tabela 3.1. A expressão para G_{il} é obtida nesta tabela pelo somatório da multiplicação de cada termo C_{ijkl} contido na mesma linha de G_{il} pelo termo $n_j n_k$ da coluna correspondente.

Tabela 3.1: Coeficientes do tensor acústico, G_{il} .

G_{il}	$n_1 n_1$	$n_2 n_2$	$n_3 n_3$	$n_2 n_3$	$n_3 n_1$	$n_1 n_2$
G_{11}	C_{1111}	C_{1221}	C_{1331}	0	0	0
G_{22}	C_{2112}	C_{2222}	C_{2332}	0	0	0
G_{33}	C_{3113}	C_{3223}	C_{3333}	0	0	0
G_{23}	0	0	0	$C_{2233} + C_{2323}$	0	0
G_{32}	0	0	0	$C_{3232} + C_{3322}$	0	0
G_{13}	0	0	0	0	$C_{1133} + C_{1313}$	0
G_{31}	0	0	0	0	$C_{3131} + C_{3311}$	0
G_{12}	0	0	0	0	0	$C_{1122} + C_{1212}$
G_{21}	0	0	0	0	0	$C_{2121} + C_{2211}$

Fonte: Autor.

A resolução da equação do movimento (equação 3.107) é realizada igualando à zero o determinante da matriz $G_{il} - \rho V^2 \delta_{il}$, como mostra a equação 3.110. Cada elemento deste determinante está apresentado na equação 3.111.

$$|G_{il} - \rho V^2 \delta_{il}| = 0 \quad (3.110)$$

$$\begin{vmatrix} (G_{11} - \rho V^2) & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & (G_{22} - \rho V^2) & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & (G_{33} - \rho V^2) \end{vmatrix} = 0 \quad (3.111)$$

A solução da equação 3.111 fornecerá as equações de velocidade das ondas ultrassônicas. Para tanto, deve-se considerar uma direção de propagação da onda ultrassônica, ou seja, valores para os cossenos diretores n_j . Será adotado propagação das ondas nas direções dos eixos 1, 2 e 3. A solução da equação 3.111 para cada direção é apresentada a seguir.

a) Propagação das ondas ultrassônicas na direção do eixo 1

Neste caso, $n_2 = n_3 = 0$ e $n_1 = 1$. Conseqüentemente, na tabela 3.1, a multiplicação de um coeficiente C_{ijkl} por n_2n_2 , n_3n_3 , n_2n_3 , n_3n_1 e n_1n_2 será nula. Então, nesta tabela, G_{il} será obtido somente pela multiplicação do correspondente coeficiente C_{ijkl} por n_1n_1 . Com isto, a equação 3.111 fica representada como na equação 3.112. Ao substituir nesta equação os valores de G_{il} fornecidos pela tabela 3.1, chega-se à equação 3.113. Resolvendo esta equação, são obtidas as equações 3.114 à 3.116, que irão resultar nas 3 equações de velocidade das ondas ultrassônicas ao se propagarem ao longo da direção do eixo 1: uma longitudinal, V_{11} , e duas de cisalhamento, V_{12} e V_{13} , polarizadas nas direções dos eixos 2 e 3, respectivamente (equações 3.117 à 3.119).

$$\begin{vmatrix} (G_{11} - \rho V^2) & 0 & 0 \\ 0 & (G_{22} - \rho V^2) & 0 \\ 0 & 0 & (G_{33} - \rho V^2) \end{vmatrix} = 0 \quad (3.112)$$

$$\begin{vmatrix} (C_{1111} - \rho V^2) & 0 & 0 \\ 0 & (C_{2112} - \rho V^2) & 0 \\ 0 & 0 & (C_{3113} - \rho V^2) \end{vmatrix} = 0 \quad (3.113)$$

$$C_{1111} - \rho V_{11}^2 = 0 \quad (3.114)$$

$$C_{2112} - \rho V_{12}^2 = 0 \quad (3.115)$$

$$C_{3113} - \rho V_{13}^2 = 0 \quad (3.116)$$

$$V_{11} = \sqrt{\frac{C_{1111}}{\rho}} \quad (3.117)$$

$$V_{12} = \sqrt{\frac{C_{2112}}{\rho}} \quad (3.118)$$

$$V_{13} = \sqrt{\frac{C_{3113}}{\rho}} \quad (3.119)$$

b) Propagação das ondas ultrassônicas na direção do eixo 2

Neste caso, $n_1 = n_3 = 0$ e $n_2 = 1$. Deste modo, na tabela 3.1, a multiplicação dos coeficientes C_{ijkl} por n_1n_1 , n_3n_3 , n_2n_3 , n_3n_1 e n_1n_2 será nula. Conseqüentemente, a obtenção de G_{il} se dará

apenas pela multiplicação do correspondente coeficiente C_{ijkl} por n_2n_2 . Deste modo, a equação 3.111 se torna a equação 3.112. Substituindo os valores de G_{il} fornecidos pela tabela 3.1 nesta equação, chega-se à equação 3.120, cuja resolução gerará às equações 3.121 à 3.123. Por sua vez, estas equações fornecerão as 3 equações de velocidade das ondas ultrassônicas ao se propagarem ao longo da direção do eixo 2: uma longitudinal, V_{22} e duas de cisalhamento, V_{21} e V_{23} , polarizadas nas direções dos eixos 1 e 3, respectivamente (equações 3.124 à 3.126).

$$\begin{vmatrix} (C_{1221} - \rho V^2) & 0 & 0 \\ 0 & (C_{2222} - \rho V^2) & 0 \\ 0 & 0 & (C_{3223} - \rho V^2) \end{vmatrix} = 0 \quad (3.120)$$

$$C_{1221} - \rho V_{21}^2 = 0 \quad (3.121)$$

$$C_{2222} - \rho V_{22}^2 = 0 \quad (3.122)$$

$$C_{3223} - \rho V_{23}^2 = 0 \quad (3.123)$$

$$V_{21} = \sqrt{\frac{C_{1221}}{\rho}} \quad (3.124)$$

$$V_{22} = \sqrt{\frac{C_{2222}}{\rho}} \quad (3.125)$$

$$V_{23} = \sqrt{\frac{C_{3223}}{\rho}} \quad (3.126)$$

c) Propagação das ondas ultrassônicas na direção do eixo 3

Neste caso, $n_1=n_2=0$ e $n_3=1$. Portanto, na tabela 3.1, a multiplicação dos coeficientes C_{ijkl} por n_1n_1 , n_2n_2 , n_2n_3 , n_3n_1 e n_1n_2 será nula. Então, G_{il} será obtido apenas pela multiplicação do correspondente coeficiente C_{ijkl} por n_3n_3 . Novamente, a equação 3.111 se torna a equação 3.112. A substituição dos valores de G_{il} , fornecidos pela tabela 3.1, na equação 3.112, fornece a equação 3.127, cuja solução resulta nas equações 3.128 à 3.130. Estas equações fornecem as 3 equações de velocidade das ondas ultrassônicas ao se propagarem na direção do eixo 3: uma longitudinal, V_{33} , e duas de cisalhamento, V_{31} e V_{32} , polarizadas nas direções dos eixos 1 e 2, respectivamente (equações 3.131 à 3.133).

$$\begin{vmatrix} (C_{1331} - \rho V^2) & 0 & 0 \\ 0 & (C_{2332} - \rho V^2) & 0 \\ 0 & 0 & (C_{3333} - \rho V^2) \end{vmatrix} = 0 \quad (3.127)$$

$$C_{1331} - \rho V_{31}^2 = 0 \quad (3.128)$$

$$C_{2332} - \rho V_{32}^2 = 0 \quad (3.129)$$

$$C_{3333} - \rho V_{33}^2 = 0 \quad (3.130)$$

$$V_{31} = \sqrt{\frac{C_{1331}}{\rho}} \quad (3.131)$$

$$V_{32} = \sqrt{\frac{C_{2332}}{\rho}} \quad (3.132)$$

$$V_{33} = \sqrt{\frac{C_{3333}}{\rho}} \quad (3.133)$$

Portanto, as equações 3.117 à 3.119, 3.124 à 3.126 e 3.131 à 3.133 são as equações de velocidade das ondas ultrassônicas ao se propagarem num meio homogêneo, anisotrópico (sem simetria do tensor C_{ijkl}) e sem tensão aplicada. Em geral, estas equações podem ser representadas pelas equações 3.134 e 3.135 para ondas longitudinais e de cisalhamento, respectivamente.

$$V_{ii} = \sqrt{\frac{C_{iii}}{\rho}} \quad (3.134)$$

$$V_{ij} = \sqrt{\frac{C_{jij}}{\rho}} \quad (3.135)$$

Sabendo-se que os elementos do tensor constitutivo C_{ijkl} do material sob tensão se relacionam de acordo com as equações 3.24 à 3.34, as velocidades das equações 3.117 à 3.119, 3.124 à 3.126 e 3.131 à 3.133 vão se relacionar de acordo com a equação 3.136. As relações de igualdade (ou desigualdade) entre as velocidades apresentadas nesta equação são as mesmas que foram obtidas na teoria da acustoelasticidade (ver equações 2.53 à 2.57).

$$V_{22} = V_{33} \quad (3.136)$$

$$V_{23} = V_{32}$$

$$V_{12} = V_{13}$$

$$V_{21} = V_{31}$$

$$V_{12} \neq V_{21}$$

$$V_{13} \neq V_{31}$$

Ao substituir as velocidades das ondas ultrassônicas representadas pelas equações 3.134 e 3.135 na equação 3.92 tem-se uma equação que relaciona o tensor constitutivo C_{ijkl} com a tensão aplicada no material. O desenvolvimento deste equacionamento será apresentado no subitem a seguir.

3.2.2 Equacionamento que relaciona o tensor constitutivo C_{ijkl} com a tensão aplicada no material

Experimentalmente, sabe-se que a variação relativa de velocidade é função da tensão aplicada no material, conforme equação 3.137 (LILLAMAND et al., 2010; BOMPAN; HAACH, 2018; RESENDE, 2018).

$$\frac{\Delta V}{V_{ij}^0} = \frac{V_{ij}^\sigma - V_{ij}^0}{V_{ij}^0} = f(\sigma) \quad (3.137)$$

Nesta equação, V_{ij}^σ é a velocidade das ondas ultrassônicas ao se propagarem no material com tensão (σ), ou seja, no material anisotrópico (sem simetria do tensor C_{ijkl}). Então, no lugar de V_{ij}^σ , foram inseridas as equações de velocidade das ondas ao se propagarem neste material, descritas pelas equações 3.134 e 3.135. Como V_{ij}^σ é a velocidade da onda num meio com tensão, o tensor C_{ijkl} correspondente é dependente desta tensão, portanto, ele foi denominado C_{ijkl}^σ . Deste modo, as equações 3.134 e 3.135 passaram a ser apresentadas como nas equações 3.138 e 3.139 para ondas longitudinais e de cisalhamento, respectivamente.

$$V_{ii}^\sigma = \sqrt{\frac{C_{iii}^\sigma}{\rho}} \quad (3.138)$$

$$V_{ij}^{\sigma} = \sqrt{\frac{C_{jij}^{\sigma}}{\rho}} \quad (3.139)$$

Na equação 3.137, V_{ij}^0 é a velocidade das ondas ultrassônicas num meio isotrópico sem tensão aplicada. Portanto, ela foi substituída pelas equações de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas neste meio, que são fornecidas pelas equações 3.140 e 3.141 para ondas longitudinais e de cisalhamento, respectivamente.

$$V_{ii}^0 = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_{iii}^0}{\rho}} \quad (3.140)$$

$$V_{ij}^0 = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_{jij}^0}{\rho}} \quad (3.141)$$

Então, para o caso de ondas longitudinais se propagando no meio, V_{ij}^{σ} e V_{ij}^0 da equação 3.137 foram substituídas pelas equações 3.138 e 3.140, respectivamente. No caso de ondas de cisalhamento se propagando, V_{ij}^{σ} e V_{ij}^0 da equação 3.137 foram substituídas pelas equações 3.139 e 3.141, respectivamente. As equações resultantes são as 3.142 e 3.143, para ondas longitudinais e de cisalhamento, respectivamente, cujas incógnitas são C_{iii}^{σ} para a primeira equação e C_{jij}^{σ} para a segunda. Para simplificar o equacionamento, foram omitidos os índices das equações 3.142 e 3.143 de modo que uma única equação passou a representar os casos de propagação de ondas longitudinais e de cisalhamento no material, conforme equação 3.144. No entanto, sabe-se que, nesta equação, $C^{\sigma} = C_{iii}^{\sigma}$ e $C^0 = C_{iii}^0$ para o caso de ondas longitudinais e que $C^{\sigma} = C_{jij}^{\sigma}$ e $C^0 = C_{jij}^0$ para o caso de ondas de cisalhamento.

$$\frac{C_{iii}^{\sigma}}{C_{iii}^0} - 2 \frac{\sqrt{C_{iii}^{\sigma}}}{\sqrt{C_{iii}^0}} + 1 - f(\sigma)^2 = 0 \quad (3.142)$$

$$\frac{C_{jij}^{\sigma}}{C_{jij}^0} - 2 \frac{\sqrt{C_{jij}^{\sigma}}}{\sqrt{C_{jij}^0}} + 1 - f(\sigma)^2 = 0 \quad (3.143)$$

$$\frac{C^\sigma}{C^0} - 2\frac{\sqrt{C^\sigma}}{\sqrt{C^0}} + 1 - f(\sigma)^2 = 0 \quad (3.144)$$

Desenvolvendo a equação 3.144 chega-se à uma equação do 2º grau (equação 3.145), cujas raízes são apresentadas nas equações 3.146 e 3.147.

$$\frac{(C^\sigma)^2}{(C^0)^2} - \frac{2(f(\sigma)^2 + 1)}{C^0} C^\sigma + f(\sigma)^2(f(\sigma)^2 - 2) + 1 = 0 \quad (3.145)$$

$$C^\sigma = C^0(f(\sigma)^2 + 1 + 2f(\sigma)) \quad (3.146)$$

$$C^\sigma = C^0(f(\sigma)^2 + 1 - 2f(\sigma)) \quad (3.147)$$

De acordo com a equação 3.147, o valor do elemento do tensor constitutivo (C^σ) irá diminuir quando o valor da tensão σ aumentar. Já a equação 3.146 indica o contrário, que o valor deste elemento irá aumentar com o acréscimo da tensão. Sabe-se por meio de ensaios experimentais que, ao aplicar tensão normal de compressão num sólido, as velocidades das ondas ultrassônicas irão aumentar (LAROSE; HALL, 2009; LILLAMAND et al., 2010; BOMPAN; HAACH, 2018; RESENDE, 2018). De acordo com as equações 3.138 e 3.139, isto só irá acontecer se o elemento do tensor aumentar de valor com o acréscimo de tensão. Portanto, a raiz correta é a apresentada na equação 3.146. Simplificando esta equação, tem-se a equação 3.148, que mostra a dependência entre o tensor constitutivo do material (C^σ) e a tensão aplicada. O termo $f(\sigma)$ nesta equação é $\frac{\Delta V}{V^0}$, conforme equação 3.137. Fazendo esta substituição na equação 3.148 chega-se à equação 3.149.

$$C^\sigma = C^0(f(\sigma) + 1)^2 \quad (3.148)$$

$$C^\sigma = C^0\left(\frac{\Delta V}{V^0} + 1\right)^2 \quad (3.149)$$

A equação 3.149 relaciona o tensor constitutivo C_{ijkl} com a tensão aplicada no material. Por meio dela, a estimativa da tensão poderia ser feita conhecendo-se um elemento do tensor C_{ijkl} do material que se quer avaliar e sem depender das constantes de Murnaghan (l , m e n).

Pensando num caso prático, suponha-se que já é conhecida uma curva da variação relativa da velocidade em função da tensão (curva acustoelástica) que poderia ser usada para representar o comportamento acustoelástico do concreto de um elemento estrutural que se deseja avaliar o estado de tensão. O estudo apresentado mostrou a possibilidade de avaliar a tensão neste elemento estrutural por meio do conhecimento de um elemento do tensor C_{ijkl} do material sob tensão. Então, seria necessário conhecer o valor de velocidade das ondas emitidas no material sob tensão. Esta velocidade seria aplicada na equação 3.138 ou 3.139, a depender se as ondas emitidas fossem longitudinais ou de cisalhamento, que forneceriam o valor do elemento do tensor C_{ijkl} do material com tensão aplicada. O valor deste elemento seria inserido na equação 3.149 e, com isto, seria encontrada a correspondente variação relativa de velocidade das ondas. O valor desta variação seria aplicado na curva acustoelástica, já conhecida, a fim de obter a tensão correspondente. Então, o elemento do tensor seria associado a um valor de tensão no material por meio da curva acustoelástica.

Sobre o valor de C^0 (da equação 3.149), existe a possibilidade de relacioná-lo com o f_{cm} do concreto por meio de uma equação empírica. Carrazedo et al. (2018) encontraram uma equação empírica que relaciona o módulo de elasticidade dinâmico do concreto com o f_{cm} e obtiveram um bom ajuste para esta equação. Da mesma maneira, poderia ser feito um estudo experimental para encontrar uma equação que forneça o valor de C^0 a partir do f_{cm} . No presente trabalho, esta equação foi determinada com um bom ajuste e está apresentada na parte de resultados experimentais. No entanto, ela foi obtida por meio de um estudo envolvendo 6 resistências e 5 prismas para cada uma delas. Um estudo com um número maior de resistências e de prismas por resistência seria importante afim de encontrar uma curva que pudesse ser usada com confiança para se estimar o valor de C^0 a partir do f_{cm} . Deste modo, C^0 também poderia ser considerado como um valor conhecido na equação 3.149. Assim, para a análise da tensão por meio desta equação, seria necessário conhecer somente o valor de V_{ij}^σ , que seria facilmente obtido ao emitir as ondas no material que se quer avaliar a tensão.

3.2.3 Determinação dos elementos da diagonal do tensor constitutivo C_{ijkl} em função do estado de tensão do material

Além de as equações 3.117 à 3.119, 3.124 à 3.126 e 3.131 à 3.133 poderem ser usadas na avaliação do estado de tensão do material, elas também poderiam fornecer os elementos da diagonal do tensor constitutivo deste material para diferentes estados de tensão.

Supondo que a tensão normal está aplicada na direção do eixo 1 (σ_{11}), o tensor constitutivo do material é aquele apresentado na equação 3.36. Ao usar as equações 3.117 à 3.119, 3.124 à 3.126 e 3.131 à 3.133, os 6 elementos da diagonal do tensor C_{ijkl} (equação 3.36) poderiam ser determinados para cada estado de deformação (ou de tensão) do material, desde que fossem conhecidas as velocidades V_{11} , V_{22} , V_{23} , V_{12} e V_{21} . Os elementos C_{1111} e C_{2222} seriam obtidos conhecendo-se as velocidades V_{11} e V_{22} , respectivamente. O elemento $2C_{2323}$ seria determinado por meio da velocidade V_{23} . Para determinar os elementos representados pela soma $C_{1212} + C_{1221}$, bastaria conhecer as velocidades V_{12} e V_{21} para obter C_{1212} e C_{1221} , respectivamente.

As velocidades V_{11} , V_{22} , V_{23} , V_{12} e V_{21} são aquelas obtidas por meio da propagação das ondas ao longo dos eixos principais 1 e 2 do sólido. Para obter os elementos fora da diagonal (equação 3.36), seria necessário que as ondas ultrassônicas se propagassem em uma trajetória inclinada em relação aos eixos principais. Isto pode ser observado pela tabela 3.1.

3.2.4 Resumo

Foi proposta uma nova abordagem para a avaliação de tensões com o ultrassom, na qual, a tensão aplicada no material poderia ser obtida por meio do conhecimento do tensor constitutivo. A equação para esta proposta não é dependente das constantes de Murnaghan (l , m e n), pois, para o seu desenvolvimento, não foram considerados termos adicionais de terceira ordem na equação da energia específica do material. Além disto, também não foi utilizada a medida de deformação de Green nesta equação.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, serão apresentados os equipamentos e materiais utilizados para a realização dos ensaios com os prismas de concreto. Além disto, são descritos os procedimentos experimentais adotados.

4.1 Equipamento e materiais utilizados

Foram ensaiados 31 prismas de concreto com dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm. Para a concretagem dos prismas, foram utilizadas fôrmas metálicas e a direção de concretagem foi ao longo de uma das dimensões de 15 cm. Foram utilizados 7 traços de concreto. Os agregados utilizados para os traços foram areia fina, areia média e brita 1, cujas composições granulométricas estão apresentadas nas tabelas 4.1 a 4.3, respectivamente. A adição mineral utilizada nos concretos de alta resistência foi a sílica ativa. A sílica foi incorporada em substituição volumétrica ao cimento no teor de 10%. Para atingir a consistência desejada, foi utilizado o aditivo superplastificante ADVA CAST 525 à base de policarboxilatos para os concretos de alta resistência e o aditivo plastificante polifuncional MIRA 94 para produção de concretos convencionais. O cimento utilizado foi o CP II Z 32.

Tabela 4.1 - Composição granulométrica da areia fina.		Tabela 4.2 - Composição granulométrica da areia média.		Tabela 4.3 - Composição granulométrica da brita 1.	
Peneira (abertura) (mm)	Massa retida (%)	Peneira (abertura) (mm)	Massa retida (%)	Peneira (abertura) (mm)	Massa retida (%)
25	0	25	0	25	0
19	0	19	0	19	0
12.5	0	12.5	0	12.5	31.82
9.5	0	9.5	0.37	9.5	34.73
6.3	0	6.3	1.00	6.3	30.70
4.75	0	4.75	0.42	4.75	1.59
2.36	0	2.36	2.15	2.36	0.47
1.18	0	1.18	11.95	1.18	0.05
0.6	0.28	0.6	25.23	0.6	0
0.3	38.02	0.3	27.46	0.3	0.05
0.15	54.24	0.15	27.03	0.15	0.17
Fundo	7.47	Fundo	4.39	Fundo	0.43
Massa retida total (%)	100	Massa retida total (%)	100	Massa retida total (%)	100

Fonte: Autor.

A tabela 4.4 apresenta para cada tipo de concreto: os prismas concretados ensaiados, a nomenclatura usada para identificar o concreto e o prisma correspondente, o traço em massa e os aditivos.

Tabela 4.4 - Traço e aditivos para cada tipo de concreto utilizado na concretagem dos 31 prismas.

Concreto	Prisma	Identificação	Traço em massa				Aditivos		
			Cimento	Areia	Brita	a/c	Sílica ativa**	ADVA*	MIRA 94*
C1	P1 ao P5	C1P1 ao C1P5	1	3.64	4.11	0.74	não	-	0.28%
C2	P1 ao P5	C2P1 ao C2P5	1	2.63	3.22	0.58	não	-	0.20%
C3	P1 ao P5	C3P1 ao C3P5	1	1.92	2.59	0.47	não	-	0.30%
C4	P1	C4P1	1	2.79	2.22	0.45	sim	1.30%	-
C5	P1 ao P5	C5P1 ao C5P5	1	2.21	1.88	0.38	sim	0.95%	-
C6	P1 ao P5	C6P1 ao C6P5	1	1.29	1.34	0.27	sim	0.80%	-
C7	P1 ao P5	C7P1 ao C7P5	1	0.91	1.12	0.23	sim	1.25%	-

Nota: *Porcentagem em relação à massa de cimento.

Nota: ** Sílica incorporada em substituição volumétrica ao cimento no teor de 10%.

Fonte: Autor.

Para cada tipo de concreto, também foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Os prismas e os cilindros foram mantidos no ambiente do laboratório durante 1 dia após a concretagem, removidos das fôrmas e imediatamente colocados numa câmara úmida para a cura até a idade de ensaio. Os 5 cilindros foram testados à compressão no mês da realização do ensaio a fim de calcular a resistência à compressão característica (f_{ck}) e a resistência à compressão média (f_{cm}) do concreto. O valor do f_{ck} foi calculado de acordo com a ABNT NBR 12655 (2015), para um número de exemplares de 2 a 5. O f_{cm} foi determinado pela média aritmética das resistências à compressão dos corpos de prova. Todos os prismas foram ensaiados em idades maiores que 1 ano.

O equipamento de ultrassom utilizado nos ensaios foi o modelo Pundit Lab⁺ (figura 4.1) produzido pela Proceq®. O software Pundit Link foi usado para a visualização das ondas ultrassônicas no computador. O equipamento de ultrassom tem apenas uma saída de sinal. Portanto, por meio dele, seria possível enviar o sinal elétrico apenas para um transdutor emissor, ligado à única saída do aparelho. No entanto, para a realização dos ensaios era necessário enviar o sinal para mais de um transdutor. Além disto, o equipamento de ultrassom possui apenas uma entrada de sinal elétrico, ou seja, o aparelho recebe o sinal elétrico de apenas um transdutor, conectado à única entrada do equipamento. Mas, durante os ensaios, seria necessário receber o sinal por meio de mais de um transdutor receptor e emitir estes sinais para o aparelho de ultrassom. Para conseguir enviar o sinal elétrico para mais de um transdutor e também receber

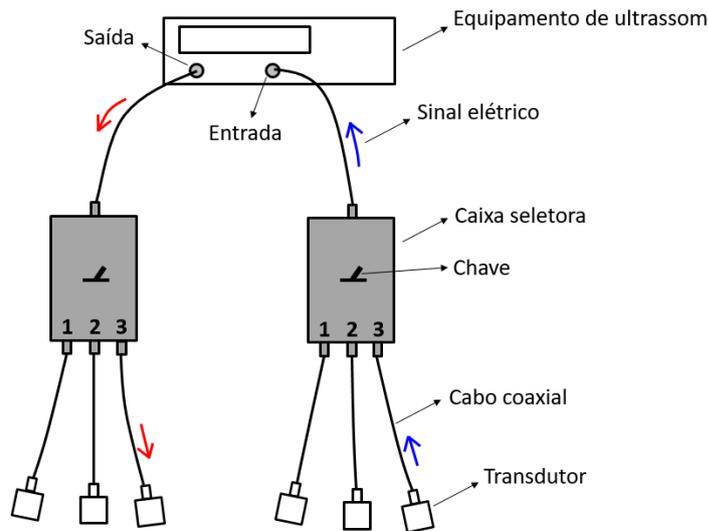
o sinal de mais de um transdutor durante os ensaios, foram construídas neste trabalho 2 caixas seletoras de sinal ultrassônico (figura 4.1). Cada caixa possui um conector de entrada e três conectores de saída de sinal ou vice-versa. Uma das caixas foi conectada à saída do sinal elétrico do equipamento do ultrassom por meio de um cabo coaxial. Como a caixa apresentava 3 saídas, puderam ser conectados à ela até três transdutores. Com isto, o sinal elétrico pôde ser enviado para três transdutores diferentes durante o ensaio. Para tanto, existiu uma chave na caixa, por meio da qual, uma das 3 saídas era selecionada para receber o sinal elétrico gerado pelo equipamento de ultrassom. A segunda caixa seletora foi conectada à entrada de sinal elétrico do equipamento do ultrassom. Como a caixa possui três conectores, que neste caso foram de entrada de sinal, puderam ser conectados à ela até 3 transdutores. Com isto, o equipamento de ultrassom pôde receber o sinal ultrassônico de até três transdutores diferentes durante o ensaio. Para tanto, também foi utilizada a chave seletora contida nesta caixa, que selecionava qual conector de entrada da caixa iria transmitir o sinal para o equipamento de ultrassom. A figura 4.2 ilustra o equipamento de ultrassom enviando um sinal elétrico (em vermelho) para a caixa seletora que, no exemplo, o está direcionando para o transdutor conectado na saída 3 da caixa, por meio da chave. No exemplo, o equipamento de ultrassom recebe o sinal elétrico (em azul) do transdutor conectado na entrada 3 da caixa. Neste caso, a chave selecionou esta entrada para transmitir o sinal recebido para o aparelho de ultrassom.

Figura 4.1 – Equipamento de ultrassom PundtLab⁺ e 2 caixas seletoras de sinal ultrassônico.



Fonte: Autor.

Figura 4.2 - Esquema de funcionamento das caixas seletoras.



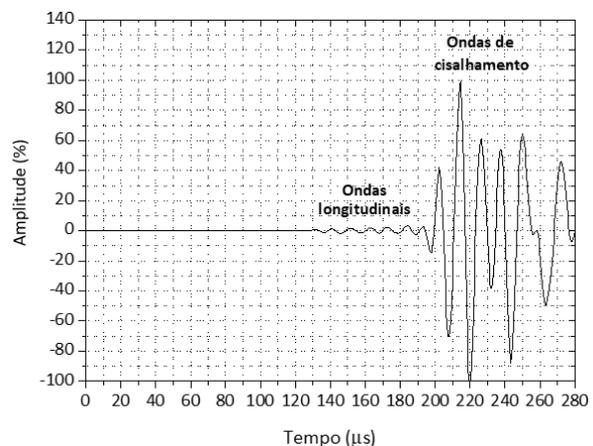
Fonte: Autor.

Para a realização dos ensaios, foram utilizados 4 transdutores de cisalhamento com frequência de 250 kHz (figura 4.3a), que emitiram ondas longitudinais e de cisalhamento simultaneamente (figura 4.3b). Também foram utilizados 2 transdutores longitudinais de 250 kHz, que emitiram apenas onda longitudinais (figura 4.4a). As superfícies do transdutor e do corpo de prova foram acopladas por meio de um gel de transmissão específico para ondas de cisalhamento. A instrumentação de cada prisma consistiu na fixação de dois transdutores de deslocamento em faces opostas do prisma (figura 4.4b). Estes transdutores foram colados nas faces onde os transdutores de ultrassom não foram posicionados. Para fazer a calibração do equipamento de ultrassom foi utilizado um cilindro de calibração, desenvolvido pela Proceq® (figura 4.5).

Figura 4.3 – (a) Transdutor de cisalhamento de 250 kHz e (b) Pulso de ondas ultrassônicas recebido pelo transdutor de cisalhamento.



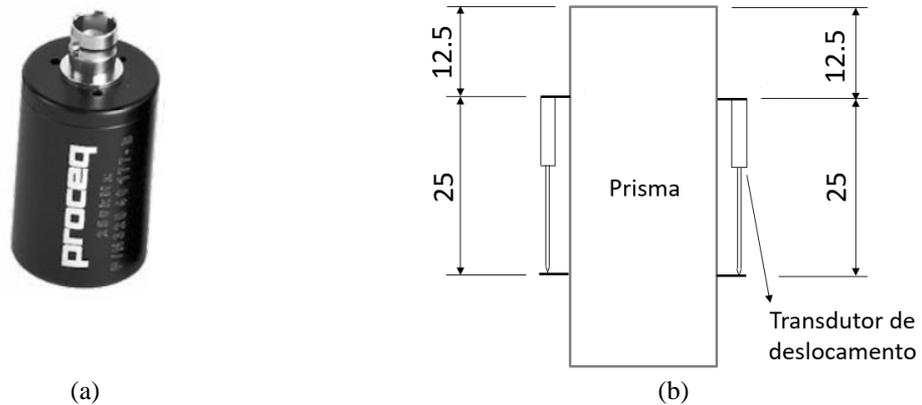
(a)



(b)

Fonte: Autor.

Figura 4.4 – (a) Transdutor longitudinal de 250 kHz e (b) Esquema da fixação dos transdutores de deslocamento em cada prisma ensaiado. Medidas em cm.



Fonte: Autor.

Figura 4.5 – Procedimento de calibração do equipamento de ultrassom usando o cilindro de calibração.

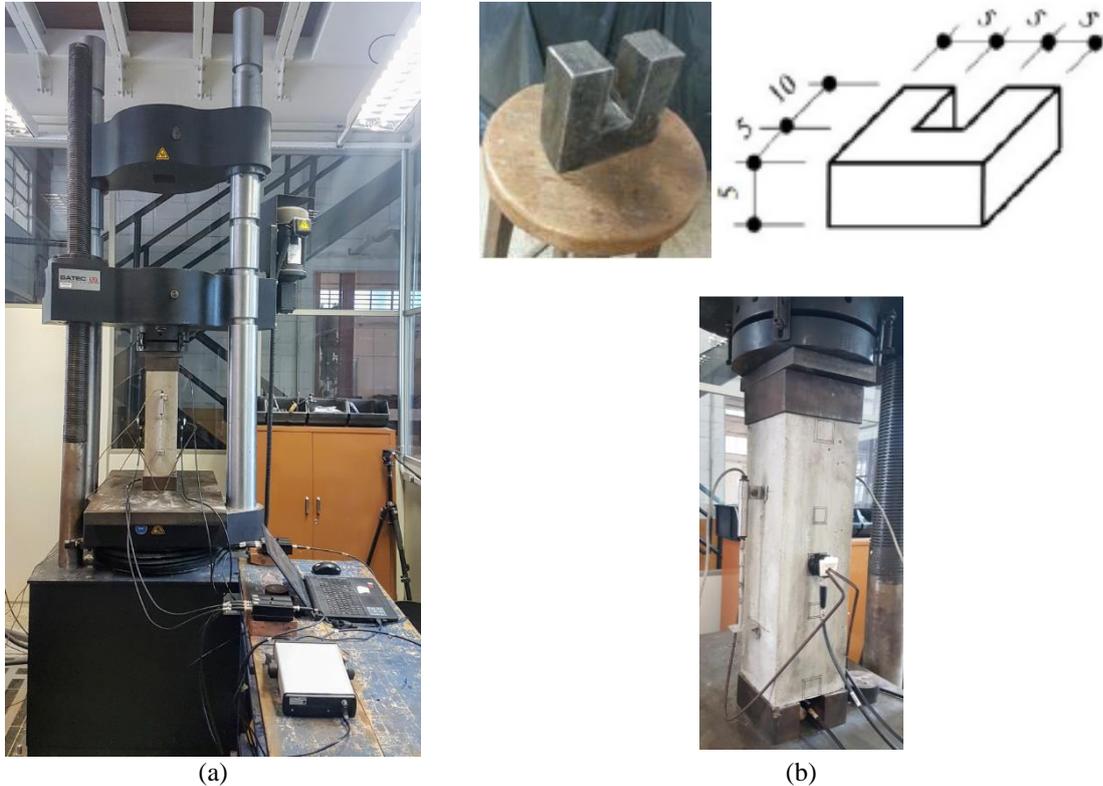


Fonte: Autor.

Os ensaios de compressão uniaxial dos prismas de concreto, juntamente com os ensaios ultrassônicos, foram realizados na máquina de ensaio Instron, modelo 300HVL, pertencente ao Laboratório de Estruturas da EESC (LE-EESC). A figura 4.6a mostra o aparato experimental quando um dos prismas foi ensaiado pelo método de transmissão direta. Quando houve necessidade de posicionar os transdutores de ultrassom nas faces de extremidade do prisma, uma peça de aço contendo uma abertura em formato de U foi colocada abaixo do prisma e outra peça idêntica foi colocada acima do mesmo (figura 4.6b). Deste modo, os transdutores puderam ser acoplados às faces de extremidade durante o carregamento e o descarregamento do prisma. Estes transdutores foram mantidos acoplados na superfície do prisma por meio de peças de isopor (figura 4.7a). Para fixar os transdutores nas faces laterais do prisma, foram utilizados 2 ganchos metálicos quando o método de ensaio foi o de transmissão direta (figura 4.7b). Nos ensaios usando ambos os métodos de transmissão, direta e indireta, e em ensaios usando apenas o método de transmissão indireta, os transdutores foram fixados às faces laterais do prisma por

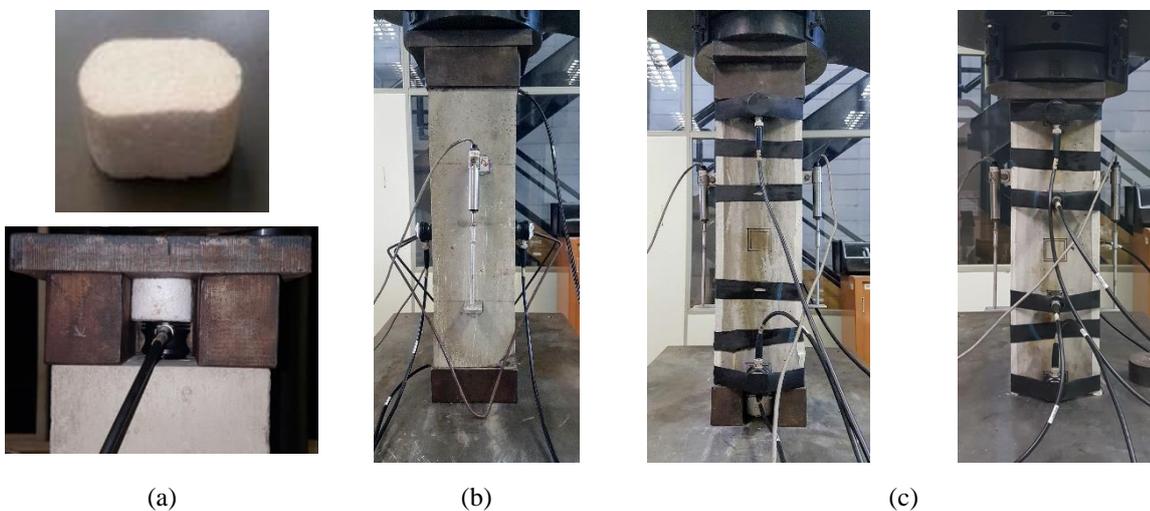
meio de faixas de borracha (figura 4.7c). As peças de isopor, os ganchos e as faixas de borracha garantiram a aplicação de pressão constante sobre os transdutores durante os ensaios.

Figura 4.6 – Aparato experimental: (a) Máquina Instron, modelo 300HVL e (b) Peça de aço em U (medidas em centímetros).



Fonte: Autor.

Figura 4.7 – Aparato experimental: (a) peça de isopor usada para fixar os transdutores localizados nas faces de extremidade do prisma, (b) ganchos metálicos usados para fixar os transdutores nas faces laterais do prisma durante o ensaio pelo método de transmissão direta e (c) Faixas de borracha usadas para fixar os transdutores nas faces laterais do prisma durante os ensaios pelo método de transmissão direta e indireta (à esquerda) e o método de transmissão indireta apenas (à direita).



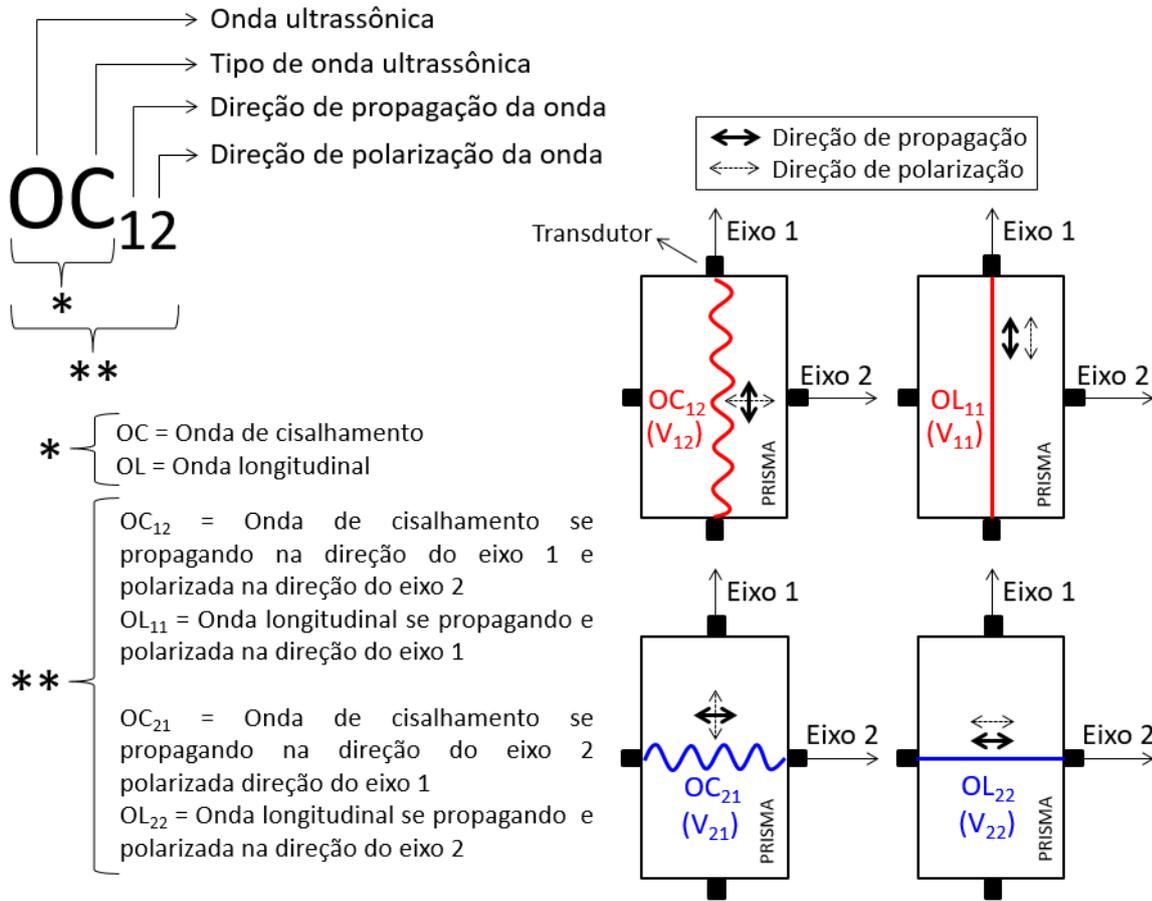
Fonte: Autor.

4.2 Ensaio usando o método de transmissão direta (Dir)

Nos ensaios pelo método de transmissão direta, foram utilizados 4 transdutores de 250 kHz cada e que emitiram ambos os tipos de ondas simultaneamente, longitudinais e de cisalhamento. As ondas ultrassônicas longitudinais (OL) e de cisalhamento (OC) foram emitidas em duas direções perpendiculares do prisma, denominadas 1 e 2. A direção 1 (eixo 1) foi definida ao longo do comprimento do prisma e coincidiu com a direção de aplicação do carregamento. A direção 2 (eixo 2) foi perpendicular à direção 1, portanto, foi definida ao longo da direção transversal do prisma (figura 4.8). As ondas que se propagaram ao longo do eixo 1 foram denominadas OL_{11} e OC_{12} e as velocidades obtidas foram V_{11} e V_{12} , respectivamente. As ondas propagadas ao longo do eixo 2 foram chamadas de OL_{22} e OC_{21} e as velocidades correspondentes, V_{22} e V_{21} . O primeiro e o segundo índices indicam as direções de propagação e de polarização das ondas, respectivamente (figura 4.8).

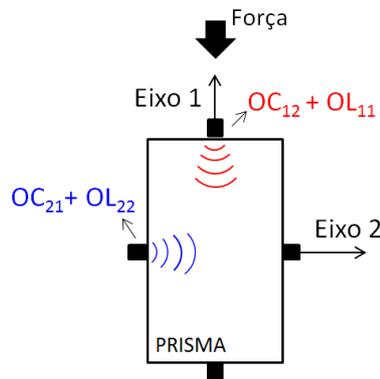
Dois transdutores foram posicionados no centro das faces de extremidade do prisma, a fim de emitir as ondas ultrassônicas ao longo do eixo 1, e dois transdutores foram acoplados no centro das faces laterais, para emití-las ao longo do eixo 2. Imediatamente antes de iniciar o carregamento do prisma, foram emitidos pulsos de ondas ultrassônicas OL_{11} , OC_{12} , OL_{22} e OC_{21} a fim de registrar os sinais ultrassônicos no prisma sem tensão antes de dar início a esta fase. Durante a fase de carregamento, incrementos iguais de força de compressão foram aplicados no prisma. A cada incremento, o valor de força resultante aplicado foi mantido constante enquanto foram emitidos pulsos de ondas ultrassônicas OL_{11} , OC_{12} , OL_{22} e OC_{21} . Logo após a aplicação do último incremento de carga de carregamento e emissão das ondas ultrassônicas, deu-se início ao descarregamento do prisma. Na fase de descarregamento, a força aplicada foi retirada em incrementos iguais aos de carregamento. Para cada incremento de carga retirado, a força resultante aplicada no prisma foi mantida constante enquanto os pulsos de ondas ultrassônicas OL_{11} , OC_{12} , OL_{22} e OC_{21} foram emitidos. Imediatamente após o fim do descarregamento, quando o prisma estava novamente sem tensão aplicada, foram emitidos os pulsos de ondas ultrassônicas OL_{11} , OC_{12} , OL_{22} e OC_{21} . A figura 4.9 ilustra a emissão das ondas ao longo dos eixos 1 e 2 para cada incremento de força aplicado ou retirado, a depender da fase do ensaio, e também imediatamente antes e após as fases de carregamento e descarregamento, respectivamente. Para a emissão das ondas, foi utilizada a chave seletora de sinal. Então, para cada valor de força aplicada no prisma mantida constante, primeiramente, eram emitidas as ondas ao longo da direção 1 (OL_{11} e OC_{12}) e, logo em seguida, na direção 2 (OL_{22} e OC_{21}). Portanto, as ondas ultrassônicas não foram emitidas simultaneamente nas direções 1 e 2.

Figura 4.8 - Nomenclatura das ondas ultrassônicas emitidas ao longo dos eixos 1 e 2 do prisma.



Fonte: Autor.

Figura 4.9 - Ondas ultrassônicas emitidas para cada valor de força aplicada no prisma durante o carregamento e o descarregamento e no prisma sem tensão, imediatamente antes e após o carregamento e o descarregamento, respectivamente



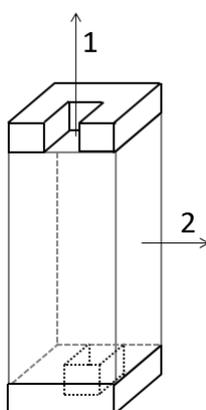
Fonte: Autor.

A fase de carregamento e a fase de descarregamento de um prisma compõe um ciclo. Portanto, o ensaio ultrassônico foi realizado num ciclo de carregamento e descarregamento do

prisma. Será visto que nem sempre foram realizados ensaios ultrassônicos durante a aplicação de um ciclo.

As peças em U foram posicionadas acima e abaixo do prisma de modo que a abertura das peças ficassem em lados opostos do prisma (figura 4.10). Esta configuração foi adotada, pois, é a que proporciona uma distribuição de tensões normais na direção do carregamento (eixo 1) mais homogênea, de acordo com o trabalho de Schiavon (2015). A figura 4.11 mostra a configuração de ensaio em um dos prismas ensaiados usando o método de transmissão direta.

Figura 4.10 – Posição das aberturas das peças de aço em U, colocadas acima e abaixo dos prismas para permitir o acoplamento dos transdutores nas faces de extremidade dos prismas no ensaio pelo método direto.



Fonte: Autor.

Figura 4.11 – Configuração de ensaio num prisma para aplicação do método da transmissão direta.



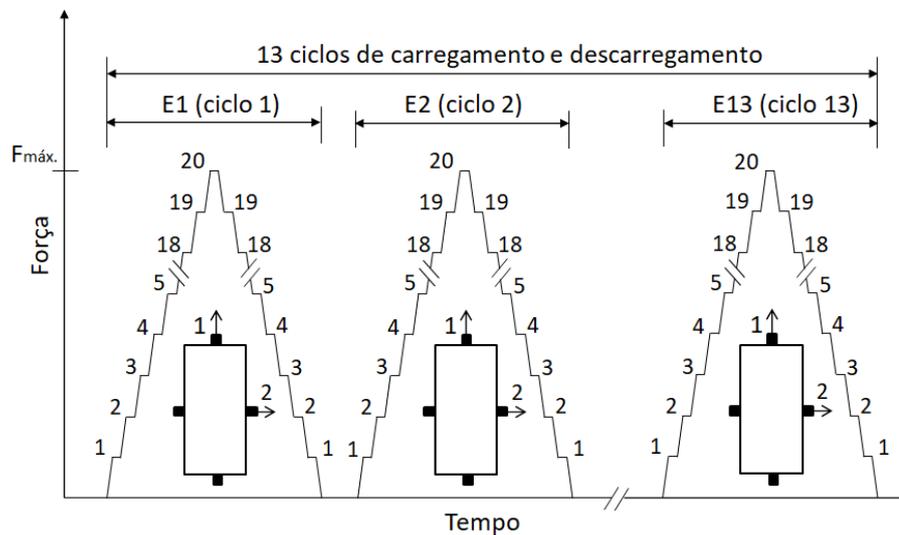
Fonte: Autor.

4.2.1 Estudo do efeito da aplicação de ciclos de carregamento e descarregamento no efeito acustoelástico usando o método da transmissão direta

Prisma C4P1

Foi realizado um estudo sobre o efeito da aplicação sequencial de 13 ciclos de carregamento e descarregamento no efeito acustoelástico. O prisma usado neste estudo foi o C4P1. Os ensaios ultrassônicos foram realizados durante a aplicação de cada ciclo, de acordo com o procedimento explicado no item 4.2. Durante a fase de carregamento, foram aplicados 20 incrementos de força de 38 kN cada, totalizando 760 kN de força aplicada com o último incremento, o que correspondeu à $49.5\%f_{ck}$ e $44\%f_{cm}$. O descarregamento foi realizado em 20 incrementos iguais aos do carregamento. Este procedimento foi repetido em cada ciclo. Ou seja, o carregamento máximo aplicado no prisma em cada ciclo foi o mesmo, de 760 kN. A figura 4.12 ilustra os 13 ciclos e ensaios (E) realizados na sequência com o prisma C4P1. Os números de 1 à 20 indicam os incrementos de força.

Figura 4.12 – Esquema da aplicação dos 13 ciclos de carregamento e descarregamento no prisma C4P1.



Fonte: Autor.

As tensões máximas aplicadas no concreto foram acima de $30\%f_{cm}$ afim de que o estudo realizado também possa ser aplicado para os casos em que os elementos estruturais de concreto estão submetidos à níveis de tensão acima do regime linear. No entanto, tomou-se o cuidado para que o sistema de fissuração gerado durante o carregamento do prisma não se tornasse instável. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), isto ocorre quando as tensões de compressão

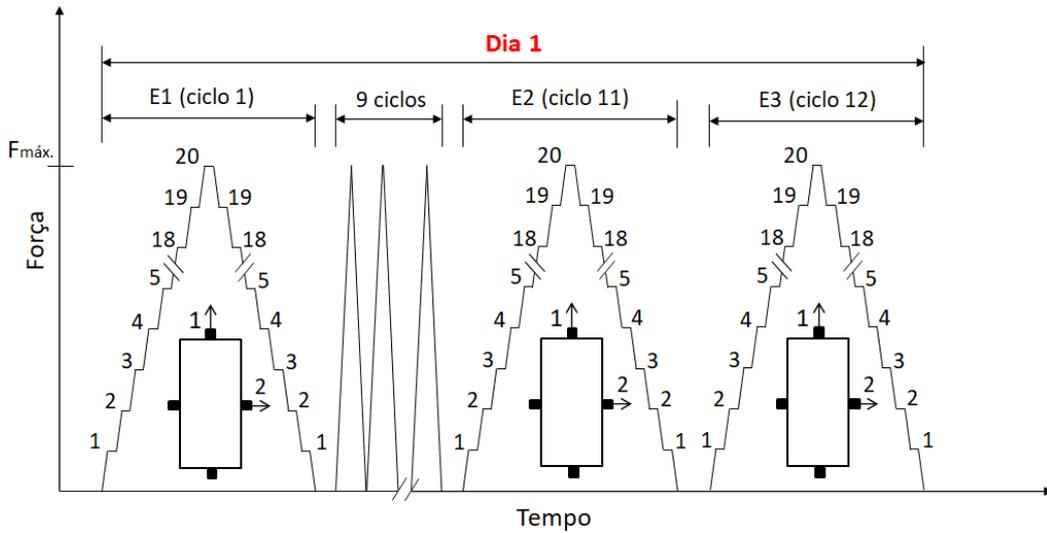
no concreto atingem valores equivalentes à 75% da tensão última. Nos ensaios realizados com o prisma C4P1, a tensão na área de concreto em contato com a peça de aço em U atingiu valores de no máximo $63.4\%f_{ck}$ e $56.4\%f_{cm}$, que estão abaixo dos 75% da tensão última. O nível máximo de tensão em torno de $60\% f_{ck}$ na área de concreto em contato com a peça em U foi mantido para os demais ensaios realizados com outros prismas neste trabalho.

Os resultados e discussões referentes aos ensaios com o prisma C4P1 estão apresentados no subitem 5.2 (“Estudo do efeito da aplicação de ciclos de carregamento e descarregamento no efeito acustoelástico usando o método de transmissão direta”).

Prisma C2P1

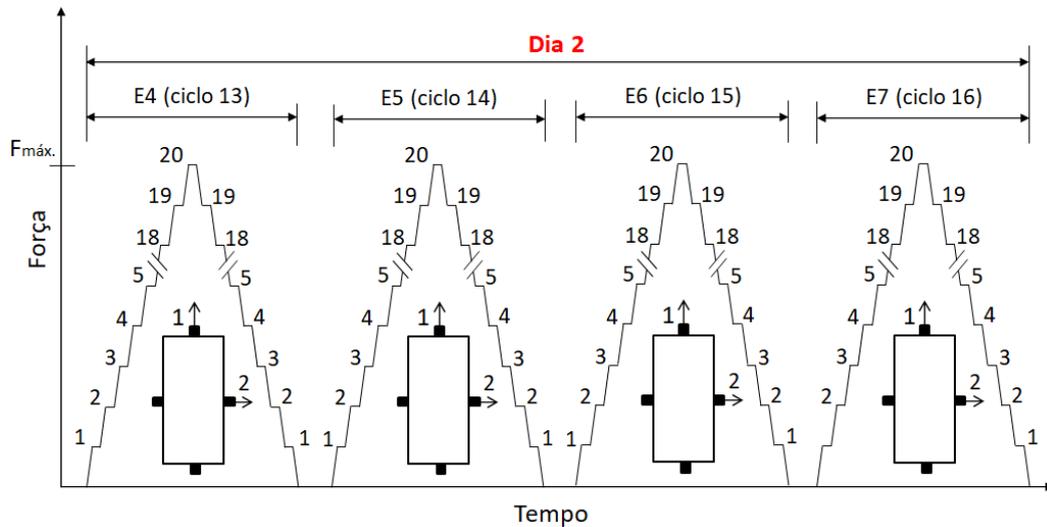
Neste prisma, os ensaios foram realizados em dois dias diferentes. No primeiro dia, foi realizado 1 ensaio ultrassônico no primeiro ciclo de carregamento e descarregamento aplicado no prisma (E1, ciclo 1). Em seguida, foram aplicados 9 ciclos de carregamento e descarregamento na sequência, sem a emissão de ondas ultrassônicas. Após o término da aplicação dos 9 ciclos, foram realizados 2 ensaios na sequência, E2 e E3, durante a aplicação dos ciclos 11 e 12, respectivamente. Após 42 dias sem aplicar qualquer carregamento no prisma, foram realizados quatro ensaios na sequência, E4, E5, E6 e E7, durante a aplicação dos ciclos 13, 14, 15 e 16, respectivamente. A realização de cada ensaio no prisma foi de acordo com o procedimento apresentado no subitem 4.2. Em resumo, cada ensaio (E) e ciclo realizados no prisma nos dois dias estão apresentados nas figura 4.13 e 4.14. O primeiro dia de ensaios foi chamado de “Dia 1” e o segundo dia, de “Dia 2”. Durante a fase de carregamento, foram aplicados 20 incrementos de força de 20 kN cada, totalizando 400 kN de força aplicada com o último incremento, correspondente à $45.1\%f_{ck}$ e $39.4\%f_{cm}$. O descarregamento foi realizado em 20 incrementos iguais aos do carregamento. Este procedimento foi repetido em cada ciclo, portanto, o carregamento máximo aplicado no prisma em cada ciclo foi o mesmo, 400 kN.

Figura 4.13 – Esquema da aplicação dos ciclos e ensaios no primeiro dia de ensaio (Dia 1) no prisma C2P1.



Fonte: Autor.

Figura 4.14 – Esquema da aplicação dos ciclos e ensaios no segundo dia de ensaio (Dia 2), realizado 42 dias após o Dia 1, no prisma C2P1.



Fonte: Autor.

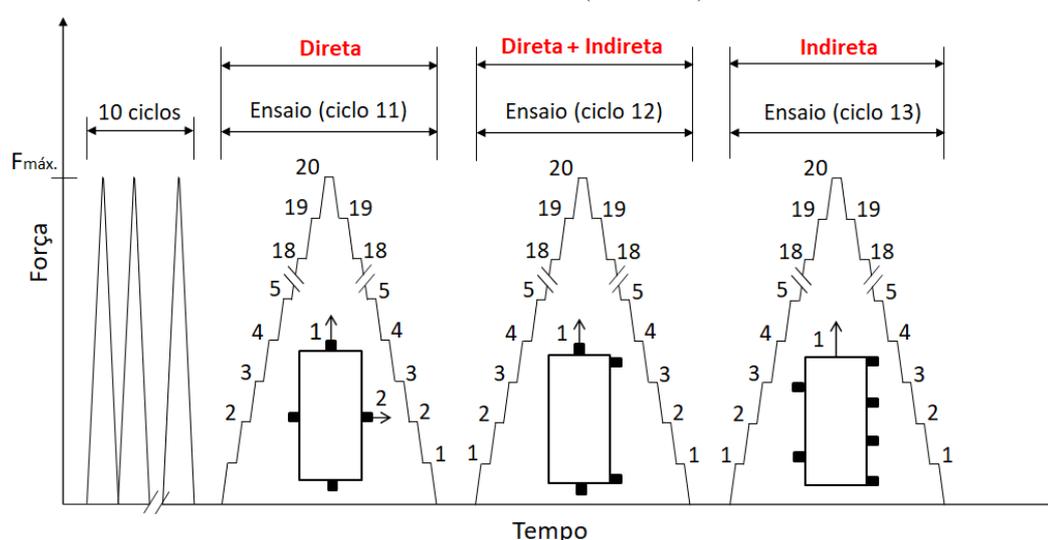
Os resultados e discussões referentes aos ensaios apresentados com o prisma C2P1 estão no subitem 5.2 (“Estudo do efeito da aplicação de ciclos de carregamento e descarregamento no efeito acustoelástico usando o método de transmissão direta”).

4.2.2 Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços pelo método de transmissão direta

Foram ensaiados 5 prismas de cada traço de concreto. Como o número de traços neste estudo foi 6, foram ensaiados 30 prismas no total. Em cada prisma, foram aplicados 10 ciclos

de carregamento e descarregamento, sem a emissão de ondas ultrassônicas, antes da realização do ensaio com ultrassom. Portanto, o ensaio foi realizado no ciclo 11 e o procedimento de ensaio foi o apresentado no subitem 4.2. Foram aplicados 20 incrementos de força durante o carregamento de cada prisma. O descarregamento foi realizado em 20 incrementos iguais aos do carregamento. A figura 4.15 mostra os ciclos e os ensaios realizados em cada prisma. Nesta figura, os prismas ensaiados, neste estudo, correspondem ao ensaio do ciclo 11 pelo método direto. Observa-se que foram ilustrados mais dois ensaios, que foram realizados na sequência deste: Ensaio (ciclo 12) e Ensaio (ciclo 13), usando os métodos de transmissão direta + indireta e o método de transmissão indireta, respectivamente. Estes ensaios pertencem à outro estudo, que será apresentado adiante.

Figura 4.15 – Esquema da aplicação dos ciclos num mesmo prisma, ensaiado pelo método de transmissão direta (“Direta”), pelos métodos de transmissão direta e indireta (“Direta+Indireta”) e apenas pelo método de transmissão Indireta (“Indireta”).



Fonte: Autor.

A tabela 4.5 apresenta, para cada prisma deste estudo, o valor do incremento de força, da força máxima e da tensão máxima aplicadas no prisma e a porcentagem de tensão máxima aplicada em relação ao f_{ck} e ao f_{cm} .

Tabela 4.5 – Valores do incremento de força, da força e da tensão máximas aplicadas e porcentagem de tensão máxima aplicada em relação ao f_{ck} e ao f_{cm} .

Concreto	Prismas	Identificação	Incremento (kN)	Força máx. (kN)	Tensão máx. (MPa)	% f_{ck}	% f_{cm}
C1	P1 ao P5	C1P1 ao C1P5	15	300	13.3	51.2	42.1
C2	P1 ao P5	C2P1 ao C2P5	20	400	17.8	45.1	38.3
C3	P1 ao P5	C3P1 ao C3P5	28.5	570	25.3	49.0	43.0
C5	P1 ao P5	C5P1 ao C5P5	38	760	33.8	49.5	42.2
C6	P1 ao P5	C6P1 ao C6P5	28.5	570	25.3	31.3	26.3
C7	P1	C7P1	30.5	610	27.1	31.5	25.1
C7	P2 ao P5	C7P2 ao C7P5	23	460	20.4	23.7	18.9

Fonte: Autor.

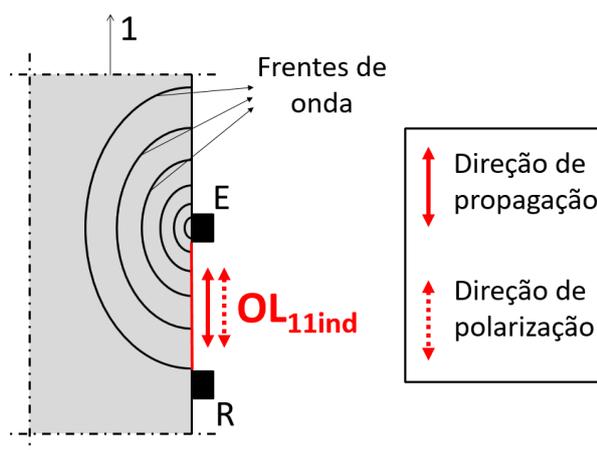
Para os prismas dos concretos C6 e C7, foi necessário que a porcentagem de tensão máxima aplicada (% f_{cm} ou % f_{ck}) fosse menor do que a que foi aplicada nos outros prismas (C1 ao C3 e C5), conforme mostra a tabela 4.5. Foram concretados alguns prismas a mais do que os 5 prismas ensaiados, para que pudessem ser feitos alguns testes nestes prismas antes dos ensaios definitivos. Ao tentar aplicar, nos prismas C6 e C7 concretados para a realização destes testes, valores de tensões com % f_{cm} semelhantes aos dos prismas C1 ao C3 e C5, verificava-se o aparecimento de fissuras na direção longitudinal dos prismas com aberturas consideráveis. Em alguns casos, ao emitir as ondas ultrassônicas através dos prismas com estas fissuras, observava-se que os sinais recebidos possuíam amplitudes muito baixas comparadas às amplitudes dos sinais recebidos antes de os prismas fissurarem desta maneira. Estas fissuras ocorriam durante a aplicação dos ciclos, antes da realização do ensaio (no ciclo 11). Não era possível completar a aplicação dos 10 ciclos, pois estas grandes fissuras ocorriam antes do término. Para evitar que isto ocorresse, a carga máxima aplicada foi reduzida. Foram feitos testes com diferentes valores máximos de carregamento a fim de verificar qual seria o máximo valor que poderia ser utilizado sem gerar aquelas fissuras. Deste modo chegou-se às cargas máximas de 570 kN e 460kN, para os prismas dos concretos C6 e C7, respectivamente. Observa-se que houve um prisma do concreto C7, o C7P1, onde a carga máxima foi maior do que a dos outros prismas deste concreto. Isto aconteceu, pois, este foi o primeiro prisma ensaiado deste traço, com a carga já reduzida para 26.3% f_{cm} , e ele não apresentou problemas de fissuração. No entanto, elas começaram a ocorrer em outros prismas do concreto C7, o que levou a concluir sobre a necessidade de reduzir ainda mais carga. Assim, para os prismas C7P2 ao C7P5, as máximas tensões aplicadas foram em torno de 19% f_{cm} .

Os resultados e discussões referentes aos ensaios apresentados com os 30 prismas estão no subitem 5.3 (Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços pelo método de transmissão direta).

4.3 Ensaios usando os métodos de transmissão direta e indireta (Dir+Ind)

A figura 4.16 mostra dois transdutores, emissor (E) e receptor (R), posicionados na mesma face de um elemento, de acordo com o arranjo de transmissão indireta. Também foram ilustradas as frentes de ondas se propagando a partir do transdutor emissor. As direções de propagação e de polarização das ondas longitudinais que chegam ao transdutor receptor são ambas na direção do eixo 1. Portanto, elas foram denominadas OL_{1ind} .

Figura 4.16 – Propagação das ondas longitudinais entre transdutores posicionados pelo método de transmissão indireta.

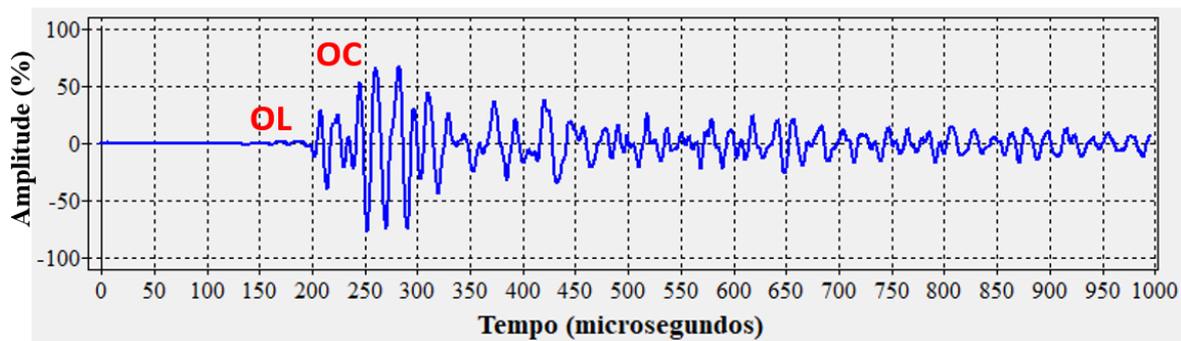


Fonte: Autor.

Neste trabalho, as ondas de cisalhamento emitidas pelo método indireto não foram analisadas, pois, houve dificuldades em identificá-las no sinal ultrassônico recebido. As figuras 4.17 e 4.18 mostram o sinal ultrassônico recebido usando os métodos direto e indireto, respectivamente, para um mesmo prisma de concreto (C1P4). Os sinais são referentes à emissão das ondas ultrassônicas no prisma sem tensão, imediatamente após o término da fase de descarregamento. No sinal recebido pelo método direto (figura 4.17), fica claro a parte do sinal que contém as ondas longitudinais (OL) e as ondas de cisalhamento (OC). Isto já não ocorre com o sinal do método indireto (figura 4.18). Nele, está evidente apenas a chegada das ondas longitudinais (OL). Portanto, não foi possível identificar a parte do sinal contendo a chegada das onda de cisalhamento neste caso. Deste modo, as análises foram realizadas apenas com a

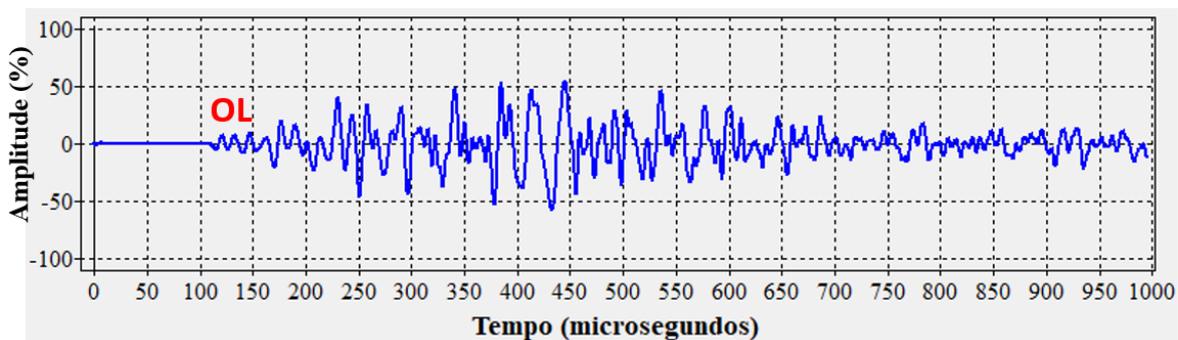
parte do sinal contendo a chegada das ondas longitudinais. Por conta disto, também só foram analisadas as ondas longitudinais pelo método direto. A figura 4.19b mostra as ondas ultrassônicas analisadas por ambos os métodos, OL_{11} e OL_{11ind} .

Figura 4.17 – Sinal ultrassônico recebido ao emitir as ondas pelo método direto no prisma C1P4 sem tensão imediatamente após o término do descarregamento do prisma.



Fonte: Autor.

Figura 4.18 - Sinal ultrassônico recebido ao emitir as ondas pelo método indireto no prisma C1P4 sem tensão imediatamente após o término do descarregamento do prisma.

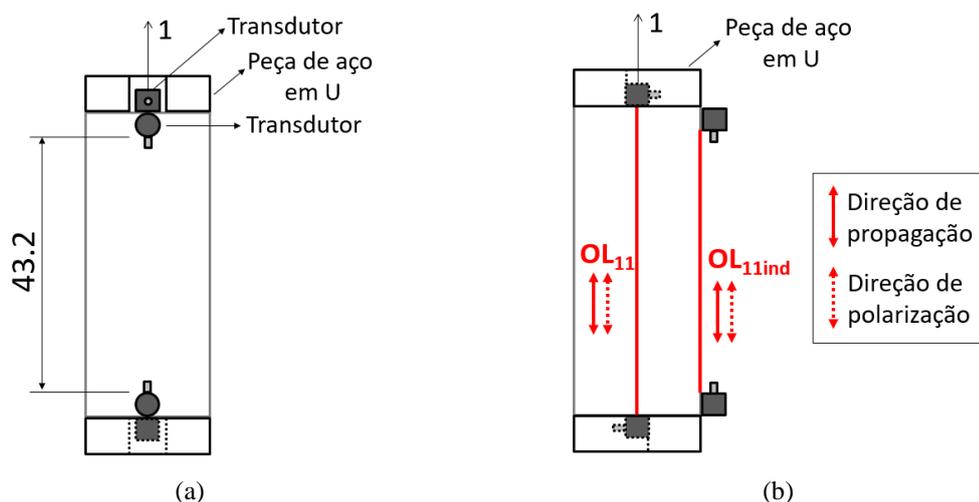


Fonte: Autor.

Nos ensaios, foram utilizados 4 transdutores de 250 kHz, que emitiram ambos os tipos de ondas simultaneamente, longitudinais e de cisalhamento. Os ensaios ultrassônicos foram realizados usando ambos os métodos de transmissão, direto e indireto, conforme mostra a figura 4.19a. Para a emissão das ondas pelo método direto, dois transdutores foram posicionados no centro das faces de extremidade dos prismas, do mesmo modo que ocorreu para a emissão das ondas na direção 1 nos ensaios pelo método de transmissão direta apresentado no subitem 4.2. Para emitir as ondas pelo método de transmissão indireta, os outros dois transdutores foram posicionados na face lateral do prisma (figura 4.19a). Nesta figura, são ilustradas também as peças de aço em U, necessárias para a realização do ensaio sempre que é preciso posicionar os transdutores nas faces de extremidade do prisma, para mostrar como os transdutores ficaram posicionados na face lateral em relação à abertura destas peças. Então, na face lateral em que

eles ficaram posicionados, existe a abertura (U) da peça na borda superior da face e a abertura da peça não existe na borda inferior da face, pois, neste caso, a abertura está do lado da face oposta.

Figura 4.19 - Ensaios pelo método de transmissão direta e indireta: (a) Configuração de ensaio. A medida está em centímetros; (b) Ondas ultrassônicas analisadas por ambos os métodos de transmissão.



Fonte: Autor.

Cada ensaio ultrassônico foi realizado em duas fases, de carregamento e descarregamento. O carregamento do prisma foi realizado por meio da aplicação de 20 incrementos iguais de força. A cada incremento aplicado, a força resultante era mantida constante para a emissão das ondas ultrassônicas pelos métodos de transmissão direta e indireta. Logo após aplicar o último incremento de carga e emitir as ondas, deu-se início ao descarregamento do prisma. O descarregamento foi realizado em 20 incrementos iguais aos do carregamento. A cada incremento retirado, a força resultante era mantida constante para a emissão das ondas ultrassônicas pelos métodos de transmissão direta e indireta. Também foram emitidas ondas ultrassônicas no prisma sem tensão: imediatamente antes de iniciar o carregamento do prisma e imediatamente após terminar o descarregamento.

Neste tipo de ensaio, a chave seletora de sinal também foi utilizada para a emissão das ondas ultrassônicas. Portanto, para cada valor de força aplicada no prisma, as ondas foram emitidas, primeiramente, por um dos métodos de transmissão, por exemplo, o direto. Logo após, elas eram emitidas usando o outro método de transmissão, neste exemplo, o indireto. Então, as ondas ultrassônicas não foram emitidas simultaneamente por ambos os métodos.

Foram ensaiados 20 prismas pelo método de transmissão direta e indireta (Dir+Ind). Estes prismas já haviam sido ensaiados apenas pelo método de transmissão direta (Dir) e ambos

os ensaios (Dir e Dir+Ind) ocorreram na sequência, conforme mostra a figura 4.15. Esta figura mostra que, nestes prismas, já haviam sido aplicados 10 ciclos de carregamento e descarregamento e mais um ciclo (ciclo 11), no qual foi realizado o ensaio com o método direto (Dir). Portanto, o ensaio usando os métodos de transmissão direta e indireta ocorreu durante a aplicação do ciclo 12 em cada um dos 20 prismas. A tabela 4.6 mostra os valores de incremento de força, força e tensão máximas aplicadas e a porcentagem de tensão máxima em relação ao f_{ck} e ao f_{cm} para cada prisma ensaiado usando ambos os métodos de transmissão das ondas. Os 20 prismas, ensaiados pelo método direto (Dir) e por ambos os métodos (Dir+Ind) foram submetidos aos mesmos valores de incrementos de força e de força máxima em ambos os ensaios (tabela 4.5 e 4.6).

Tabela 4.6 - Valores do incremento de força, da força e da tensão máximas aplicadas e porcentagem de tensão máxima aplicada em relação ao f_{ck} e ao f_{cm} .

Concreto	Prismas	Identificação	Incremento (kN)	Força máx. (kN)	Tensão máx. (MPa)	% f_{ck}	% f_{cm}
C1	P1 ao P5	C1P1 ao C1P5	15	300	13.3	51.2	42.1
C2	P2, P4 e P5	C2P2, C2P4 e C2P5	20	400	17.8	45.1	38.3
C3	P3, P4 e P5	C3P3, C3P4 e C3P5	28.5	570	25.3	49.0	43.0
C5	P3, P4 e P5	C5P3, C5P4 e C5P5	38	760	33.8	49.5	42.2
C6	P3, P4 e P5	C6P3, C6P4 e C6P5	28.5	570	25.3	31.3	26.3
C7	P3, P4 e P5	C7P3, C7P4 e C7P5	23	460	20.4	23.7	18.9

Fonte: Autor.

A figura 4.20 mostra a configuração de ensaio num dos prismas ensaiados usando os métodos de transmissão direta e indireta.

Figura 4.20 – Configuração de ensaio num prisma ensaiado usando os métodos de transmissão direta e indireta: (a) face com os transdutores posicionados pelo arranjo indireto e (b) face oposta à mostrada em (a).



(a)



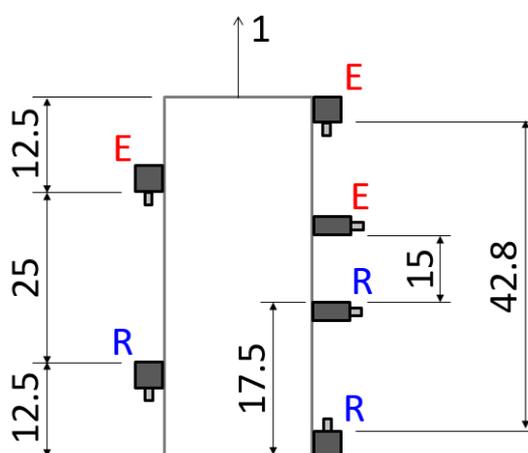
(b)

Fonte: Autor.

4.4 Ensaios usando o método da transmissão indireta (Ind)

Foram realizados ensaios usando apenas o método de transmissão indireta com diferentes distâncias entre os transdutores. A figura 4.21 mostra a configuração de ensaio. Foram utilizados 4 transdutores de 250 kHz que emitiram ambos os tipos da ondas ultrassônicas, longitudinais e de cisalhamento. Estes transdutores foram posicionados no prisma com distâncias entre suas faces de 42.8 cm e 25 cm (figura 4.21). Também foram utilizados 2 transdutores de 250 kHz que emitiram apenas ondas longitudinais. Estes foram posicionados no prisma com distância entre suas faces de 15 cm (figura 4.21). Neste ensaio, não foram colocadas as peças de aço em U acima e abaixo do prisma. Isto foi feito para proporcionar uma distribuição de tensões mais homogênea no prisma quando a tensão de compressão fosse aplicada. Como um dos objetivos deste ensaio foi comparar o efeito acustoelástico obtido por meio do método indireto com diferentes distância entre transdutores, era importante que a tensão média no caminho de propagação das ondas fosse a mesma, independente da distância entre os transdutores.

Figura 4.21 – Configuração de ensaio usando apenas o método de transmissão indireta. E e R indicam “emissor” e “receptor”, respectivamente. As medidas estão em centímetros e indicam a distância entre as faces dos transdutores.



Fonte: Autor.

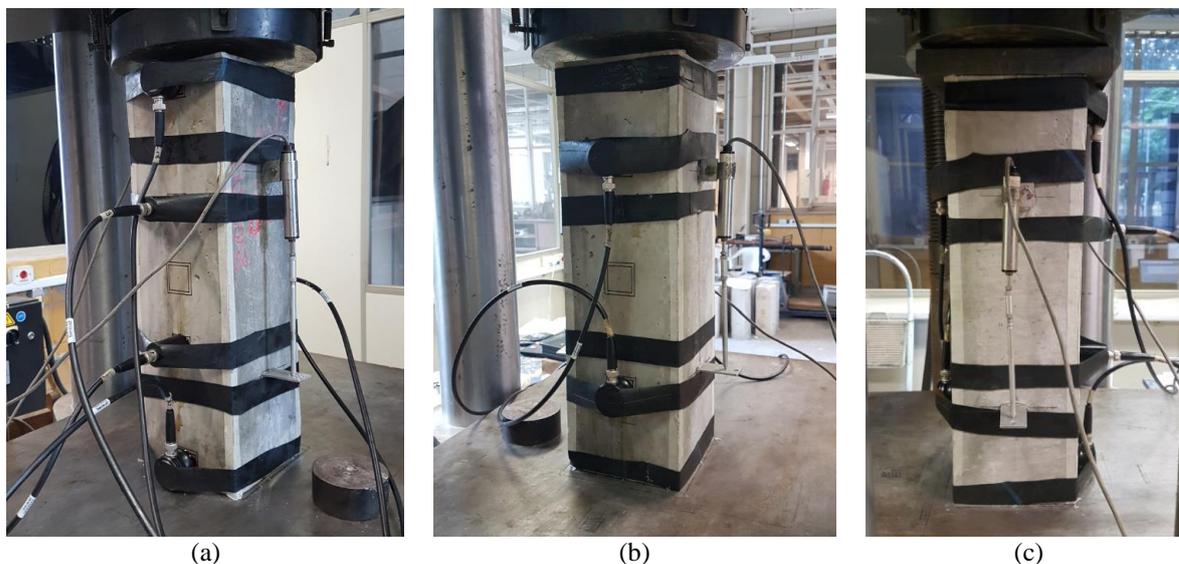
Cada ensaio foi realizado em duas fases, de carregamento e de descarregamento. No carregamento, foram aplicados 20 incrementos iguais de força. A cada incremento aplicado, a força resultante foi mantida constante para e emissão das ondas ultrassônicas usando a chave seletora de sinal. Como haviam três pares de transdutores emissores-receptores, a chave seletora foi utilizada três vezes alterando o caminho do sinal elétrico para cada um dos três emissores. Então, a cada incremento de força aplicado, as ondas ultrassônicas foram emitidas três vezes,

uma vez de cada transdutor emissor. Ou seja, a cada incremento aplicado, foram obtidos os sinais ultrassônicos das ondas propagadas nas três diferentes distâncias entre transdutores: 15 cm, 25 cm e 42.8 cm. Logo após aplicar o último incremento de carga, deu-se início à fase de descarregamento do prisma. O descarregamento foi realizado em 20 incrementos iguais aos de carregamento. A cada incremento retirado, as ondas ultrassônicas eram emitidas usando a chave seletora, do mesmo modo que foi feito para a fase de carregamento. Deste modo, a cada incremento de carga retirado foram obtidos os sinais ultrassônicos das ondas propagadas nas três diferentes distâncias entre transdutores: 15 cm, 25 cm e 42.8 cm. Também foram emitidas ondas ultrassônicas no prisma sem tensão aplicada imediatamente antes de iniciar a fase de carregamento e imediatamente após o término da fase de descarregamento.

Foram ensaiados 18 prismas pelo método de transmissão indireta (Ind), 3 prismas de cada traço (C1, C2, C3, C5, C6 e C7). Estes prismas já haviam sido ensaiados pelo método de transmissão direta (Dir) e pelos métodos de transmissão direta e indireta (Dir+Ind). O ensaio pelo método de transmissão indireta (Ind) ocorreu na sequência destes dois anteriores, conforme mostra a figura 4.15. Esta figura mostra o histórico de ciclos e ensaios nestes 18 prismas. Antes do ensaio usando o método indireto (Ind), já haviam sido realizados, nestes prismas, 10 ciclos de carregamento e descarregamento e 2 ensaios, um no ciclo 11 e outro no ciclo 12. Então, os ensaios pelo método de transmissão indireta ocorreram no ciclo 13. Os valores de incremento de força, força e tensão máximas aplicadas e a porcentagem de tensão máxima em relação ao f_{ck} e ao f_{cm} para cada prisma ensaiado está apresentada na tabela 4.6. Esta tabela se refere aos 18 prismas, com exceção do C1P1 e C1P2.

A figura 4.22 mostra a configuração de ensaio num prisma ensaiado apenas pelo método de transmissão indireta. Em (a), é mostrado o par de transdutores de cisalhamento de 250 kHz espaçados de 42.8 cm e o par de transdutores longitudinais de 250 kHz espaçados de 15 cm. Em (b) é apresentada a face oposta à mostrada em (a) com o par transdutores de cisalhamento de 250 kHz espaçados de 25 cm. Por fim, em (c) é possível visualizar os três pares de transdutores posicionados em faces opostas do prisma.

Figura 4.22 – Configuração de ensaio num prisma usando apenas o método de transmissão indireta: (a) transdutores espaçados de 42.8 cm e 15 cm, (b) transdutores espaçados de 25 cm (face oposta à mostrada em (a)) e (c) vista do prisma com os 3 pares de transdutores usados no ensaio.



Fonte: Autor.

Os ensaios usando os métodos de transmissão direta e indireta (Dir+Ind) e os ensaios usando apenas o método de transmissão indireta (Ind), apresentados nos subitens 4.3 e 4.4 foram realizados para o “Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços usando o método da transmissão indireta”, cujos resultados e discussões estão apresentados no subitem 5.4.

4.5 Resumo dos ensaios

Conforme apresentado, os procedimentos experimentais foram utilizados em 3 grandes estudos. Cada um deles e os métodos de transmissão das ondas utilizados estão resumidos a seguir:

Estudo 1:

Estudo do efeito da aplicação de ciclos de carregamento e descarregamento no efeito acustoelástico usando o método da transmissão direta. Foi utilizado apenas o método de transmissão direta (Dir).

Estudo 2:

Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços pelo método de transmissão direta. Foi utilizado apenas o método da transmissão direta (Dir).

Estudo 3:

Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços usando o método da transmissão indireta. Foram utilizados dois tipos de ensaios, usando os métodos da transmissão direta e indireta (Dir+ Ind) e apenas o método da transmissão indireta (Ind).

A tabela 4.7 mostra os prismas ensaiados para cada estudo e o método de transmissão das ondas utilizado.

Tabela 4.7 – Prismas ensaiados em cada estudo e os métodos de transmissão das ondas usados nos ensaios.

Concreto	Estudo 1	Estudo 2	Estudo 3	
	Diretas	Diretas	Diretas + Indiretas	Indiretas
C1	-	P1 ao P5	P1 ao P5	P3, P4 e P5
C2	P1	P1 ao P5	P2, P4 e P5	P2, P4 e P5
C3	-	P1 ao P5	P3, P4 e P5	P3, P4 e P5
C4	P1	P1 ao P5	P3, P4 e P5	P3, P4 e P5
C5	-	P1 ao P5	P3, P4 e P5	P3, P4 e P5
C6	-	P1 ao P5	P3, P4 e P5	P3, P4 e P5
C7	-	P1 ao P5	P3, P4 e P5	P3, P4 e P5

Fonte: Autor.

4.6 Processamento de sinais

O processamento de sinais realizado para obter a variação relativa de velocidade ($\Delta V/V_0$) das ondas ultrassônicas durante as fases de carregamento e de descarregamento dos prismas foi a Interferometria por Ondas Coda (CWI) usando o método dos deslocamentos. Portanto, as curvas da variação relativa de velocidade em função da tensão no concreto foram geradas por meio deste método. A Interferometria por Ondas Coda (CWI) foi realizada usando o software CWI, versão 4, desenvolvido pelo professor Vladimir G. Haach, da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

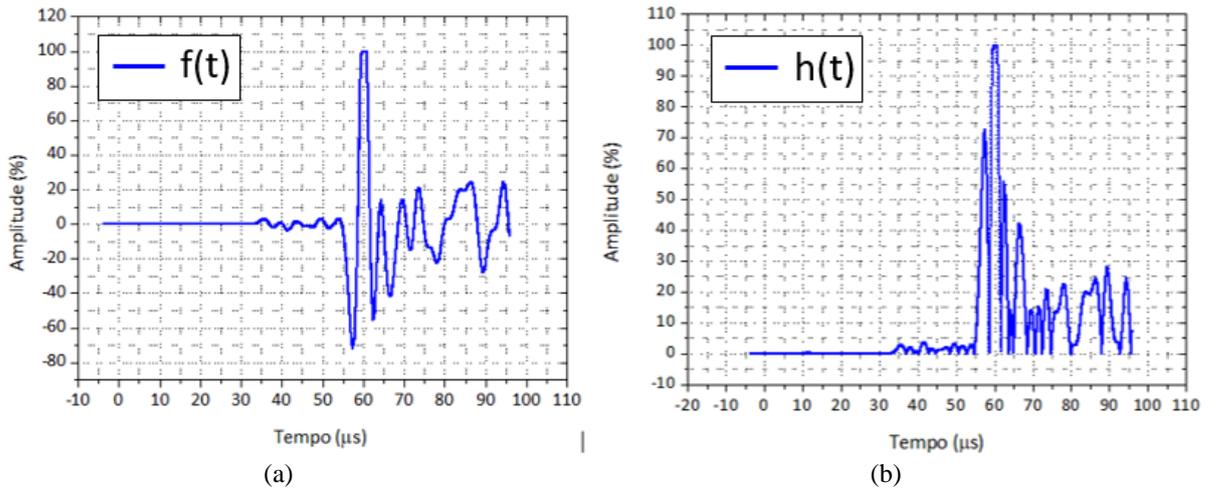
Quando foi necessário obter o valor da velocidade das onda ultrassônicas e não da variação relativa de velocidade, foi utilizado o programa desenvolvido no trabalho de Schiavon (2015). Este programa fornece o tempo de chegada das ondas ultrassônicas por meio da aplicação das equações 4.1 4.2 e 4.3, consecutivamente, no sinal ultrassônico $f(t)$, conforme figuras 4.23 e 4.24. Na figura 4.24b, t_{COL} e t_{COC} indicam o tempo de chegada dos ondas longitudinais e de cisalhamento, respectivamente.

$$h(t) = |f(t)| \tag{4.1}$$

$$g(z) = \text{Máx}_{0 \leq t \leq z} \{h(t)\} \tag{4.2}$$

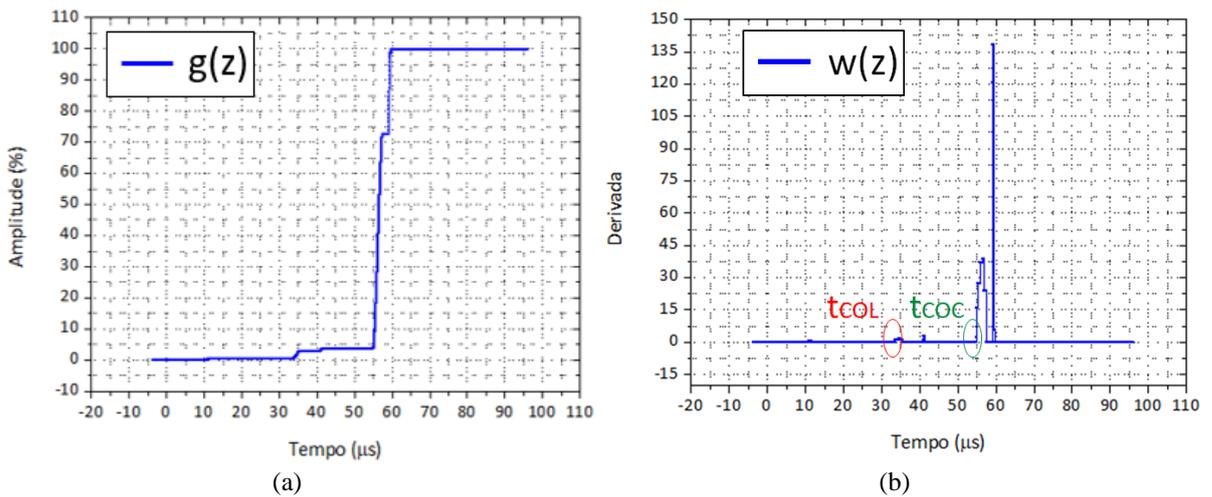
$$w(z) = \lim_{\xi \rightarrow 0^+} \frac{g(z + \xi) - g(z)}{\xi} \tag{4.3}$$

Figura 4.23 – Procedimento usado para a determinação do tempo de chegada das ondas longitudinais e de cisalhamento: (a) sinal ultrassônico f(t) e (b) h(t).



Fonte: Adaptado de Schiavon (2015).

Figura 4.24 – Procedimento usado para a determinação do tempo de chegada das ondas longitudinais e de cisalhamento: (a) g(z) e (b) w(z).



Fonte: Adaptado de Schiavon (2015).

A velocidade foi calculada pela razão entre a distância de percurso das ondas e o tempo de chegada. As velocidades das ondas foram usadas para o cálculo das seguintes constantes elásticas do concreto de cada prisma: módulo de elasticidade longitudinal dinâmico (E_{din}),

coeficiente de Poisson dinâmico (ν_{din}) e elementos do tensor constitutivo do concreto sem tensão aplicada, $C_{iii}^0 = \lambda + 2G$ e $C_{jij}^0 = G$. Os valores destas constantes elásticas estão apresentados na tabela 5.1.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste item, são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados no programa experimental. Primeiro são apresentadas as propriedades mecânicas e elásticas calculadas para cada prisma. Depois, são discutidos os resultados referentes ao estudo dos ciclos de carregamento e descarregamento em dois prismas de concreto, C4P1 e C2P1. Em seguida, são discutidos os resultados sobre o estudo da acustoelasticidade em prismas de concreto de diferentes traços utilizando o método de transmissão direta. Por fim são discutidos os resultados do estudo sobre a acustoelasticidade nos prismas de diferentes traços, mas, utilizando o método de transmissão indireta.

5.1 Propriedades mecânicas e elásticas dos prismas de concreto

A resistência à compressão média (f_{cm}), o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico (E_{din}), o coeficiente de Poisson dinâmico (ν_{din}), os elementos do tensor constitutivo do material sem tensão $C_{iii}^0 = \lambda + 2G$ e $C_{jjj}^0 = G$ e a densidade (ρ) foram determinados e estão apresentados na tabela 5.1. Os cálculos de ν_{din} e E_{din} foram realizados por meio das equações 5.1 e 5.2 (ORTEGA, et al., 2011). C_{iii}^0 e C_{jjj}^0 são elementos do tensor constitutivo do material sem tensão (isotrópico), cujo cálculo depende das velocidades das ondas longitudinais e de cisalhamento, respectivamente, no material sem tensão, conforme as equações 3.140 e 3.141.

$$\nu_{din} = \frac{\left(\frac{V_{ii}^0}{V_{ij}^0}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_{ii}^0}{V_{ij}^0}\right)^2 - 1\right]} \quad (5.1)$$

$$E = \frac{V_{ii}^2(1+\nu)(1-2\nu)\rho}{(1-\nu)} \quad (5.2)$$

Tabela 5.1– Propriedades mecânicas e elásticas dos 31 prismas de concreto.

Prisma	f_{cm} (MPa)	f_{ck} (MPa)	E_{din} (MPa)	ν_{din}	$C_{iii}^0 = \lambda + 2G$ (MPa)	$C_{jij}^0 = G$ (MPa)	ρ (kg/m ³)
C1P1	31.7	26.1	35316.7	0.20	39427.7	14669.6	2324.0
C1P2	31.7	26.1	35983.8	0.19	39669.1	15074.3	2324.0
C1P3	31.7	26.1	35146.4	0.18	38352.3	14834.6	2324.0
C1P4	31.7	26.1	34944.9	0.19	38471.0	14653.4	2324.0
C1P5	31.7	26.1	36210.8	0.19	39859.9	15185.5	2324.0
C2P1	49.5	39.4	40735.8	0.19	44917.4	17062.5	2408.9
C2P2	49.5	39.4	40290.2	0.21	45520.8	16612.0	2408.9
C2P3	49.5	39.4	40066.9	0.21	45034.0	16572.0	2408.9
C2P4	49.5	39.4	39899.5	0.21	45158.9	16433.8	2408.9
C2P5	49.5	39.4	40234.7	0.21	45489.2	16582.4	2408.9
C3P1	58.9	51.7	44202.4	0.24	51720.7	17885.7	2481.5
C3P2	58.9	51.7	44324.2	0.22	50269.1	18234.5	2481.5
C3P3	58.9	51.7	44328.8	0.22	50789.0	18132.1	2481.5
C3P4	58.9	51.7	44042.3	0.22	50341.6	18038.4	2481.5
C3P5	58.9	51.7	44848.8	0.21	50752.2	18474.1	2481.5
C4P1	76.7	68.3	48956.4	0.22	56094.8	20024.2	2422.2
C5P1	80.1	68.2	50308.2	0.23	58004.8	20508.3	2485.9
C5P2	80.1	68.2	50000.7	0.24	58705.9	20198.5	2485.9
C5P3	80.1	68.2	51169.4	0.22	58252.1	21004.9	2485.9
C5P4	80.1	68.2	50812.0	0.22	58376.4	20753.2	2485.9
C5P5	80.1	68.2	49409.6	0.24	58128.2	19940.8	2485.9
C6P1	96.3	81.0	51842.5	0.22	58943.9	21296.5	2508.1
C6P2	96.3	81.0	52058.8	0.22	59369.1	21348.8	2508.1
C6P3	96.3	81.0	52152.7	0.22	59334.5	21416.2	2508.1
C6P4	96.3	81.0	52254.5	0.22	59519.6	21443.8	2508.1
C6P5	96.3	81.0	51662.1	0.21	58084.7	21363.7	2508.1
C7P1	108.2	86.1	54861.2	0.24	64325.1	22176.4	2542.2
C7P2	108.2	86.1	55418.0	0.23	64728.2	22443.4	2542.2
C7P3	108.2	86.1	55108.0	0.24	64597.8	22278.9	2542.2
C7P4	108.2	86.1	54661.7	0.24	64859.1	21973.4	2542.2
C7P5	108.2	86.1	55528.7	0.24	65320.2	22411.4	2542.2

Fonte: Autor.

5.2 Estudo do efeito da aplicação de ciclos de carregamento e descarregamento no efeito acustoelástico usando o método de transmissão direta

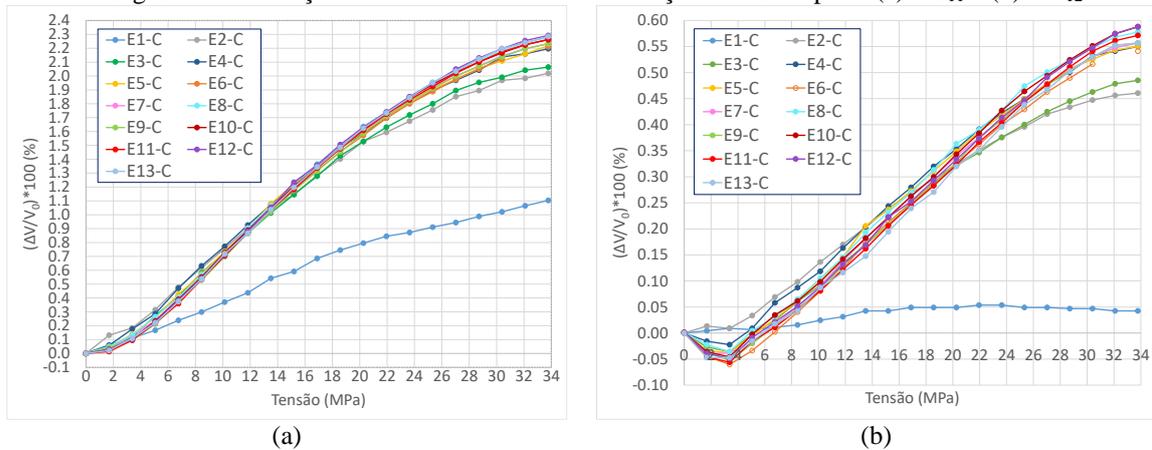
Os resultados dos ensaios de ciclos de carregamento e descarregamento para os prismas C4P1 e C2P1 são apresentados e discutidos. As discussões começam com o prisma C4P1 e depois são realizadas para o prisma C2P1.

5.2.1 Prisma C4P1 – Análises para a fase de carregamento

Discussão 1: Diferença entre a curva acustoelástica do primeiro ensaio e dos demais ensaios.

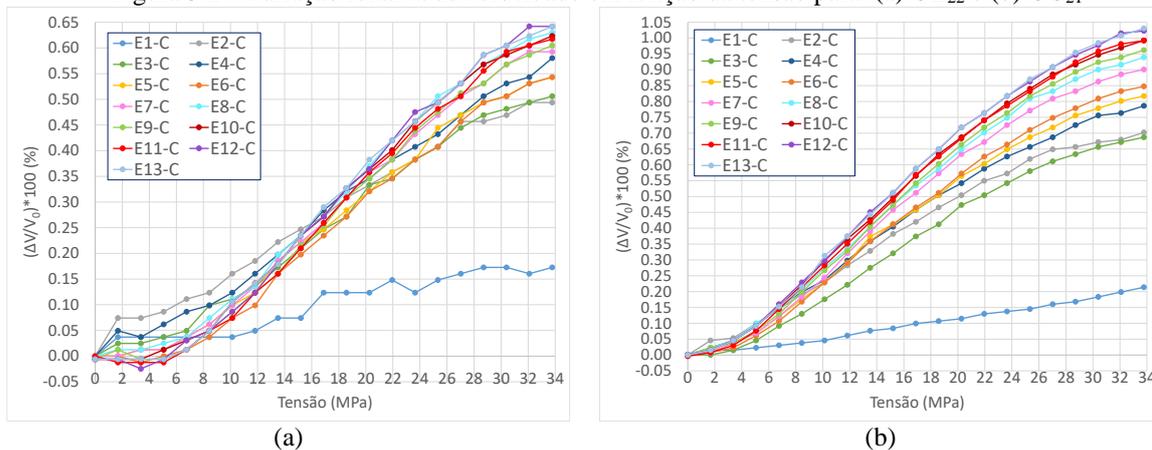
Os gráficos da variação relativa da velocidade das ondas ($\Delta V/V_0$) em função da tensão aplicada (σ) no prisma na fase de carregamento (C) dos ensaios 1 (E1) ao 13 (E13) estão apresentados nas figuras 5.1 e 5.2 para as ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁. Para a elaboração de cada gráfico, o sinal de referência (V_0) usado no CWI foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão no início da fase de carregamento de cada ensaio. Ou seja, as curvas referentes ao ensaio 1 foram geradas usando como sinal de referência as ondas emitidas no prisma sem tensão antes de iniciar o carregamento do ensaio 1. Para as curvas relativas ao ensaio 2, o sinal de referência foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão antes de iniciar o carregamento do ensaio 2. O mesmo procedimento foi adotado para gerar as curvas referentes aos demais ensaios.

Figura 5.1 - Variação relativa de velocidade em função da tensão para: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



Fonte: Autor.

Figura 5.2 - Variação relativa de velocidade em função da tensão para: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.



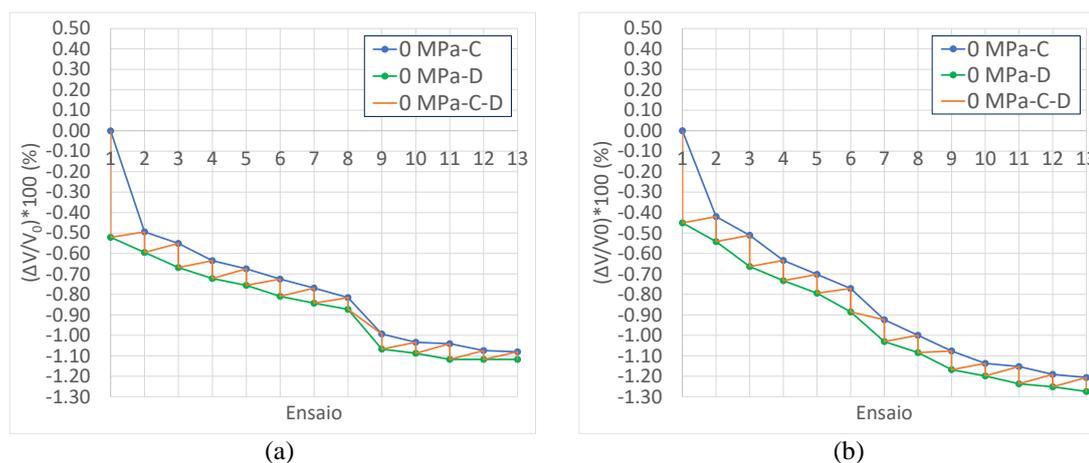
Fonte: Autor.

Durante o primeiro ensaio, são gerados danos (fissuras) no concreto quando os incrementos de carga são aplicados no prisma. O valor da variação da velocidade das ondas (ΔV) gerada com a aplicação de cada incremento é o resultado da combinação da variação de velocidade que é causada pelo efeito acustoelástico (ΔV_{σ}) com a que é causada pelo dano (ΔV_D). A primeira, ΔV_{σ} , é positiva, pois, o efeito acustoelástico é responsável por aumentar o valor da velocidade quando ocorre acréscimo da tensão de compressão. Já a variação causada pelo dano é negativa, pois, este gera redução no valor da velocidade das ondas. Foi observado que a curva acustoelástica do primeiro ensaio (E1) diferiu bastante das curvas dos demais ensaios (E2 ao E13), já que, os valores de variação relativa de velocidade na curva do primeiro ensaio foram bem menores do que os obtidos nas demais curvas para iguais valores de tensão aplicada. Assim, a curva do ensaio 1 apresentou inclinação bem menor do que as demais, indicando taxa menor de ganho de velocidade com o acréscimo de tensão. Como os incrementos de tensão foram os mesmos em todos os ensaios, ou seja, a variação de velocidade gerada pelo efeito acustoelástico (ΔV_{σ}) foi a mesma, a grande diferença entre a curva do primeiro ensaio e as curvas dos ensaios seguintes ocorreu por causa de diferentes intensidades de danificação geradas nestes ensaios.

De acordo com o efeito Kaiser (SHOKOUHI; ZOEGA; WIGGENHAUSER, 2010), quando são aplicados valores de carregamento que não ultrapassam o valor máximo já aplicado anteriormente no material, a danificação neste não irá aumentar. Então, de acordo com este efeito, as curvas acustoelásticas obtidas de ensaios nos quais a carga máxima aplicada foi sempre a mesma, não teriam a influência do dano, apenas do efeito acustoelástico. No entanto, na realidade, ocorre aumento do dano no material mesmo quando os valores de carga aplicados já tenham sido aplicados anteriormente. O que acontece, é que os novos danos são bem menores do que aqueles gerados quando um determinado valor de carga foi aplicado pela primeira vez. Por isto, houve grande diferença nos valores de velocidade relativa entre o primeiro e os demais ensaios. No primeiro, os danos foram gerados pela primeira vez e, por isto, foram maiores do que os gerados nos demais ensaios, para os mesmos valores de tensão. Consequentemente, o efeito do dano teve maior influência na curva do primeiro ensaio, o que fez com que a variação da velocidade (ΔV) com o acréscimo de tensão fosse bem menor neste caso em comparação com os demais ensaios. No primeiro ensaio, a variação relativa de velocidade das ondas OL₂₂, OC₂₁, OL₁₁ e OC₁₂ foi de 0.17%, 0.21%, 1.10% e 0.04%, respectivamente, quando a tensão aplicada foi máxima (33.8 MPa). Já para o segundo ensaio, estes valores passaram para 0.51%, 0.70%, 2.02% e 0.46% na tensão máxima (ver figuras 5.1 e 5.2).

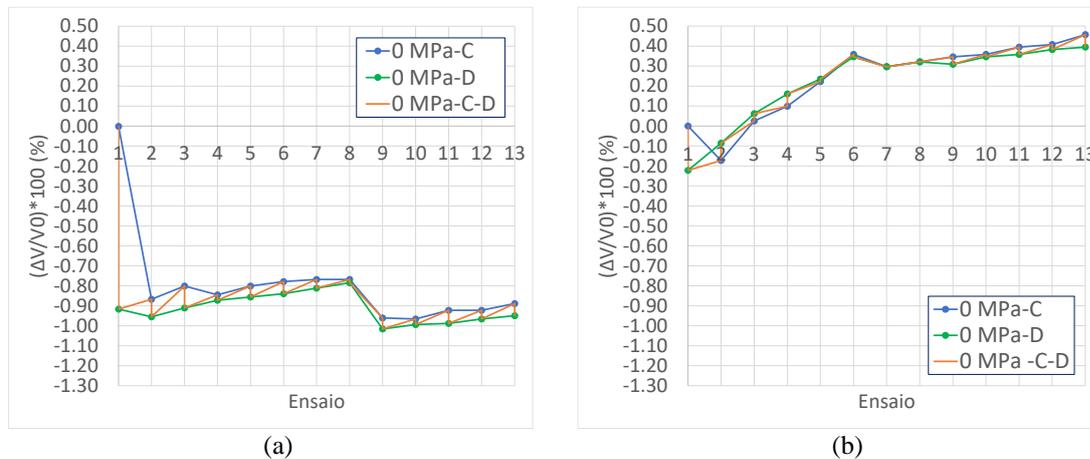
As figuras 5.3a, 5.3b, 5.4a e 5.4b referem-se às ondas OC_{12} , OC_{21} , OL_{11} e OL_{22} , respectivamente. Na curva azul destas figuras, é apresentada a variação relativa de velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão imediatamente antes de iniciar a fase de carregamento de cada ensaio (E1 ao E13) usando o sinal emitido no prisma sem tensão imediatamente antes de iniciar a fase de carregamento do primeiro ensaio (E1) como referência para a realização do CWI. Então, nesta curva, estão apresentadas as variações de velocidade do sinal correspondente à 0 MPa emitido antes do carregamento de cada ensaio em relação ao sinal para 0 MPa emitido antes do carregamento do ensaio 1. Esta curva foi denominada 0 MPa-C. A curva verde mostra a variação relativa de velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão logo após finalizar a fase de descarregamento de cada ensaio (E1 ao E13) usando o sinal emitido no prisma sem tensão imediatamente antes de iniciar a fase de carregamento do primeiro ensaio (E1) como referência para a realização do CWI. Deste modo, nesta curva, estão apresentadas as variações de velocidade entre o sinal correspondente à 0 MPa após o descarregamento de cada ensaio em relação ao sinal para 0 MPa antes do carregamento do ensaio 1. Esta curva foi denominada 0 MPa-D. Então, ambas as curvas, azul e verde, foram geradas usando o mesmo sinal ultrassônico de referência, aquele emitido no prisma sem tensão antes do carregamento do ensaio 1. Ou seja, as curvas azul e verde foram elaboradas usando o mesmo V_0 .

Figura 5.3 - Variação relativa de velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento (em azul) e após o descarregamento (em verde) para cada ensaio usando a velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento do ensaio 1 como referência. Os tipos de ondas ultrassônicas são: (a) OC_{12} e (b) OC_{21} .



Fonte: Autor.

Figura 5.4 - Variação relativa de velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento (em azul) e após o descarregamento (em verde) para cada ensaio usando a velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento do ensaio 1 como referência. Os tipos de ondas ultrassônicas são: (a) OL₁₁ e (b) OL₂₂.



Fonte: Autor.

Nas figuras 5.3 e 5.4, os gráficos na cor laranja são formados por segmentos de reta verticais e inclinadas que conectam os pontos entre as curvas em azul e verde. O segmento vertical laranja que une os dois pontos correspondentes ao ensaio 1 nas curvas azul e verde indica a variação de velocidade das ondas ocorrida logo após o término do ensaio 1. Ou seja, mostra a variação de velocidade que foi gerada durante as fases de carregamento e descarregamento do prisma neste ensaio. O mesmo raciocínio se aplica aos outros segmentos verticais em laranja que unem dois pontos de um mesmo ensaio das curvas azul e verde. Observou-se para os quatro tipos de ondas ultrassônicas que a realização do primeiro ensaio no prisma gerou redução na velocidade das ondas. Esta redução foi de 0.52%, 0.45%, 0.92% e 0.22% para as ondas OC₁₂, OC₂₁, OL₁₁ e OL₂₂, respectivamente. Ela foi causada pelos danos (fissurações) que ocorreram quando o carregamento foi aplicado pela primeira vez no prisma.

Observou-se que para as ondas de cisalhamento, OC₁₂ e OC₂₁ (figuras 5.3a e 5.3b), a redução de velocidade causada pela realização do ensaio 1, de 0.52% e 0.45%, respectivamente, foi bem maior do que a encontrada após a realização do ensaio 2, de 0,1% e 0.12%, respectivamente. Esta observação também é válida para os demais ensaios, visto que, a partir do ensaio 2, as reduções de velocidade obtidas ao final dos ensaios foram bem menores do que a encontrada ao final do ensaio 1. Isto comprova que os danos gerados durante o ensaio 1, quando o carregamento é aplicado pela primeira vez no material, foram bem maiores do que os danos gerados a partir do ensaio 2. Consequentemente, a inclinação da curva do ensaio 1 se tornou bem menor do que a inclinação das curvas dos ensaios subsequentes.

Ainda com relação às ondas de cisalhamento (figuras 5.3a e 5.3b), observou-se que houve uma recuperação parcial na velocidade das ondas ultrassônicas entre o término de um

ensaio e início do ensaio seguinte. Isto foi verificado pelos segmentos de reta inclinados em laranja que ligam dois ensaios consecutivos. Os segmentos inclinados crescentes entre dois ensaios indicam ganho de velocidade. Observou-se nas figuras 5.3a e 5.3b, que as velocidades das ondas apresentaram certa recuperação (ganho) entre o término de um ensaio e início de outro ensaio, mas que esta recuperação foi pequena. Com isto, a velocidade das ondas ultrassônicas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento de um certo ensaio continuou sendo maior que a velocidade das ondas emitidas antes do carregamento do ensaio seguinte. Por isto, a curva em azul foi decrescente, indicando que a velocidade de propagação das ondas emitidas no prisma antes da realização dos ensaios sofreu redução com o decorrer destes ensaios. A curva verde decrescente indica o mesmo, mas, com relação às velocidades das ondas emitidas após o descarregamento do prisma. Ou seja, as velocidades de propagação das ondas emitidas no prisma logo após o seu descarregamento sofreu redução com o decorrer dos ensaios.

Referente às ondas longitudinais OL_{11} (figura 5.4a), a redução na velocidade causada pela realização do ensaio 1, de 0,92%, foi bem maior do que a encontrada após a realização do ensaio 2, de 0,09%. Esta observação também se aplicou aos demais ensaios. Pois, a partir do ensaio 2, as reduções de velocidade geradas ao final dos ensaios foram bem menores do que a encontrada ao final do ensaio 1. Como discutido anteriormente, isto também foi observado para as ondas de cisalhamento. Portanto, para o caso das ondas OL_{11} , também ficou comprovado que os danos gerados durante o ensaio 1, quando o carregamento foi aplicado pela primeira vez no material, foram bem maiores do que aqueles danos gerados a partir do ensaio 2. Deste modo, a inclinação da curva do ensaio 1 foi bem menor do que a das curvas dos ensaios seguintes.

Ainda sobre as ondas OL_{11} (figura 5.4a), também se observou uma recuperação na velocidade das ondas entre o término de um ensaio e o início do ensaio seguinte. Os segmentos de reta crescente em laranja, que ligam um certo ensaio ao ensaio seguinte, mostraram que também houve um certo ganho de velocidade entre o término de um ensaio e o início do ensaio seguinte para as ondas OL_{11} . No entanto, diferentemente do que ocorreu com as ondas de cisalhamento, este ganho de velocidade (ou recuperação) foi suficiente para que a velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento de um certo ensaio fosse maior do que a velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento do ensaio anterior. Consequentemente, a curva em azul se tornou crescente. Ou seja, ela indica que a velocidade das ondas ultrassônicas emitidas no prisma antes do seu carregamento aumentou com o decorrer dos ensaios. O mesmo comportamento foi observado para a curva verde,

indicando que a velocidade das ondas ultrassônicas emitidas no prisma logo após o seu descarregamento aumentou com o decorrer dos ensaios.

Sobre as ondas longitudinais OL₂₂ (figura 5.4b), houve redução de 0.22% na velocidade das ondas logo após o término do ensaio 1. No entanto, entre os ensaios 2 e 4, ao invés de ocorrer redução na velocidade das ondas logo após a realização destes ensaios, observou-se o contrário. As velocidades das ondas emitidas no prisma sem tensão logo após o descarregamento do prisma foram maiores do que a velocidade das ondas emitidas no prisma sem tensão antes do seu carregamento. Com isto, a curva em verde ficou acima da curva em azul entre os ensaios 2 e 4. Entre os ensaios 5 e 8 as curvas azul e verde estão praticamente sobrepostas, indicando que a velocidade das ondas emitidas antes do carregamento e após o descarregamento foram as mesmas, ou seja, não houve variação. A partir do ensaio 9, o comportamento das curvas verde e azul se tornou semelhante ao ocorrido no caso das ondas OL₁₁. A curva em azul permaneceu acima da verde e ambas as curvas são crescentes. Portanto, a partir do ensaio 9, observou-se redução na velocidade das ondas logo após a realização dos ensaios, que foi verificada pelas retas laranjas verticais. Também foi observada a recuperação com ganho da velocidade entre o término de um ensaio e o início do ensaio seguinte, indicada pelas retas laranjas inclinadas crescentes. Então, no caso das ondas OL₂₂, confirmou-se que a redução na velocidade das ondas após a realização do ensaio 1 foi bem maior do que a redução na velocidade ocorrida após os ensaios 9 ao 13. A redução de velocidade após o ensaio 1 também foi maior do que a ocorrida após os ensaios 5 e 8, já que a variação na velocidade após estes ensaios foi praticamente nula. Com isto, ficou comprovado que as inclinações das curvas acustoelásticas dos ensaios 5 ao 13 foram bem maiores do que a inclinação da curva do ensaio 1 por causa dos danos gerados no primeiro ensaio terem sido bem maiores. No caso dos ensaios 2 ao 4, como houve aumento de velocidade após a realização de cada um deles, também foi verificado que a redução de velocidade ocorrida após a realização do ensaio 1 foi a responsável pela inclinação bem menor da curva referente à este ensaio em relação aos demais.

Além das variações relativas de velocidade em função da tensão bem menores no primeiro ensaio em comparação com os demais, observou-se também que a curva acustoelástica correspondente às ondas OC₁₂, no ensaio 1, apresentou um comportamento diferente do esperado (figura 5.1b). As velocidades das ondas aumentaram em função do acréscimo de tensão até o valor de 13.5 MPa. Entre este valor de tensão e 22 MPa, as velocidades praticamente não se alteraram. Após 22MPa, ocorreu diminuição nos valores da velocidade com o aumento da tensão aplicada. Este comportamento mostrou que, no caso das ondas OC₁₂, o efeito do dano no primeiro ensaio foi maior do que este efeito nos outros tipos de ondas

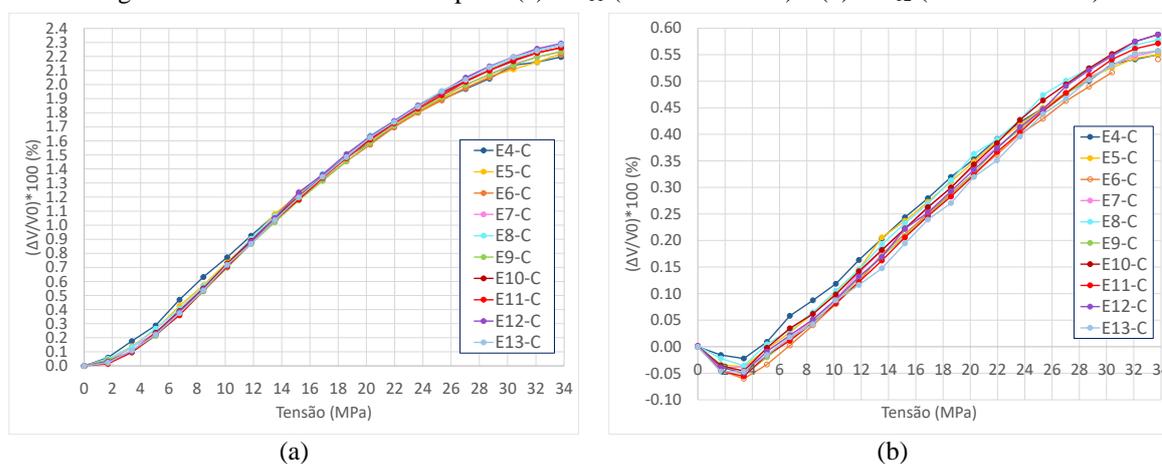
ultrassônicas a partir de um determinado valor de tensão, fazendo com que as velocidades diminuíssem ao invés de aumentarem com a aplicação do carregamento.

Este estudo permitiu verificar que o primeiro ciclo de carregamento no elemento de concreto não é o adequado para a realização do ensaio ultrassônico visando o estudo da acustoelasticidade. Existe um ciclo mais apropriado para tanto, como será visto na discussão a seguir.

Discussão 2: Estabilização da curva acustoelástica

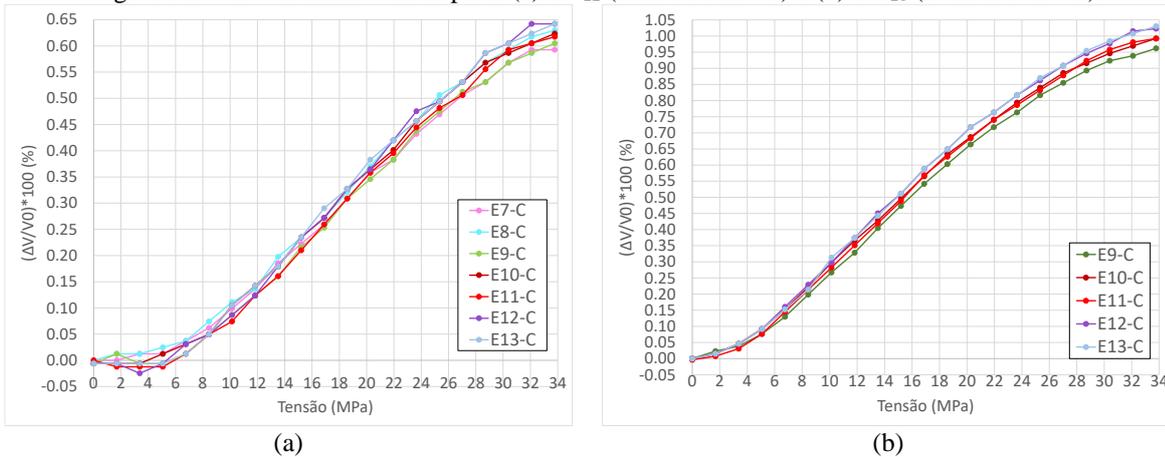
Para todos os tipos de ondas, observou-se um aumento no efeito acustoelástico entre as curvas do 1º e 2º ensaios, do 2º e 3º ensaios e assim por diante até a curva de um determinado ensaio a partir da qual este efeito se estabilizou (figuras 5.1 e 5.2). Quando isto ocorreu, as curvas passaram a ficar muito próximas, não havendo mais um aumento deste efeito com o aumento da quantidade de ensaios. Portanto, existe um número de ensaios (ou de ciclos) a partir do qual o efeito acustoelástico passa a ser praticamente o mesmo nos ensaios seguintes. No caso das ondas OL₁₁, este ensaio foi o 4, pois, a partir dele, as curvas estão praticamente sobrepostas. A figura 5.5a mostra apenas as curvas estabilizadas para as ondas OL₁₁. No caso das ondas OC₁₂, a estabilização também ocorreu a partir do ensaio 4 (ver figura 5.5b). Observou-se que as curvas estabilizadas deste tipo de onda estão um pouco mais dispersas (espaçadas) em comparação com as curvas das ondas OL₁₁ para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$. Em relação às ondas OL₂₂, a estabilização das curvas ocorreu a partir do ensaio 7 (figura 5.6a). Assim como no caso das ondas OC₁₂, as curvas estabilizadas das OL₂₂ estão mais espaçadas do que as das OL₁₁ para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$. Para as ondas OC₂₁, a estabilização ocorreu a partir do ensaio 9 (figura 5.6b).

Figura 5.5 - Curvas estabilizadas para: (a) OL₁₁ (ensaios 4 ao 13) e (b) OC₁₂ (ensaios 4 ao 13).



Fonte: Autor.

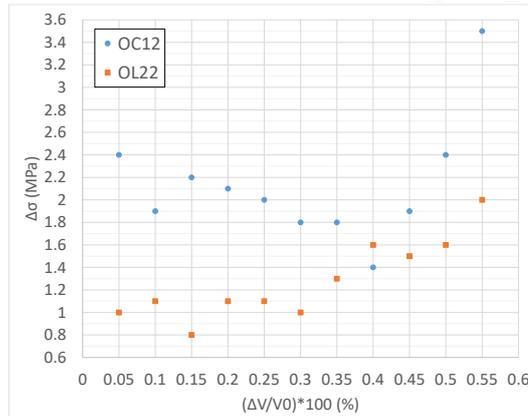
Figura 5.6 - Curvas estabilizadas para: (a) OL₂₂ (ensaios 7 ao 13) e (b) OC₂₁ (ensaios 9 ao 13).



Fonte: Autor.

Apesar de as curvas estabilizadas das ondas OC₁₂ (figura 5.5b) se apresentarem mais dispersas em relação àquelas das ondas OL₁₁ (figura 5.5a) para iguais valores de $\Delta V/V_0$, esta dispersão é pequena, visto que, ela gera um pequeno intervalo de variação no valor da tensão para um determinado valor de variação relativa de velocidade. Por exemplo, quando $\Delta V/V_0$ é 0.15%, as curvas das OC₁₂ se encontram dentro de um intervalo de tensões entre 11.4 MPa e 13.6 MPa. Ou seja, a máxima variação que poderia ser encontrada no valor da tensão correspondente seria de 2.2 MPa. Quando $\Delta V/V_0$ é 0.3%, o intervalo de tensões está entre 17.8 MPa e 19.6 MPa, uma diferença de 1.8 MPa. Para $\Delta V/V_0$ igual a 0.50%, o intervalo de tensões está entre 27 MPa e 29.4 MPa, variação de 2.4 MPa. Com base nas figuras 5.5b e 5.6a, foi desenvolvida a figura 5.7. Nela, estão apresentados valores de variação relativa da velocidade entre 0.05% e 0.55% e as correspondentes variações máximas de tensão ($\Delta\sigma$) encontradas no intervalo de tensões das curvas das OC₁₂ e OL₂₂. Observou-se que a variação de tensão fica em torno de 2MPa e 1 MPa para as ondas OC₁₂ e OL₂₂, respectivamente.

Figura 5.7 - Variação relativa da velocidade e as correspondentes variações máximas de tensão obtidas a partir das curvas estabilizadas das ondas OC₁₂ e OL₂₂.



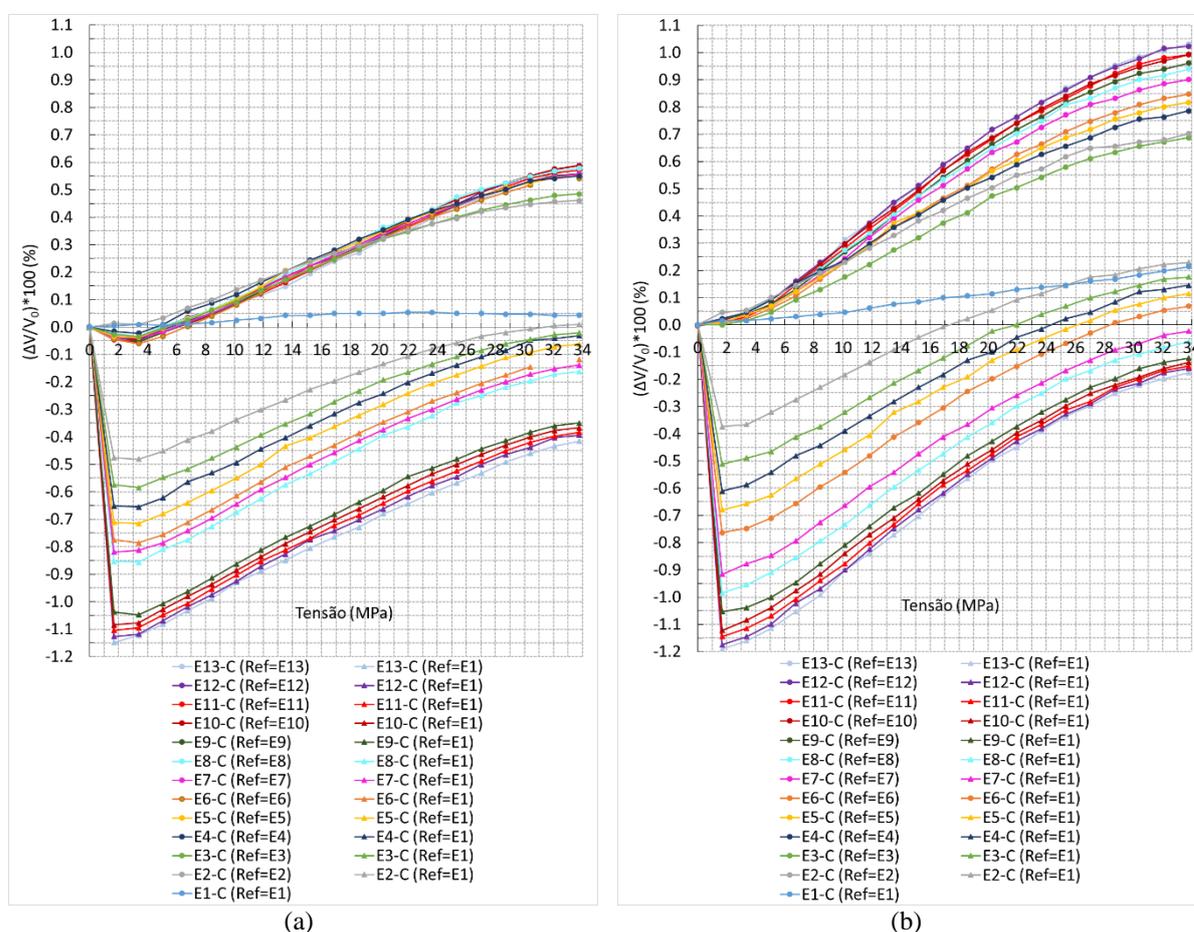
Fonte: Autor.

Causa da estabilização da curva acustoelástica

a) Ondas de Cisalhamento

A figura 5.8 apresenta as curvas da variação relativa de velocidade das ondas de cisalhamento em função da tensão para a fase de carregamento dos ensaios 1 ao 13 usando diferentes sinais ultrassônicos como referência (Ref) para a geração das curvas.

Figura 5.8: Variação relativa da velocidade em função da tensão durante o carregamento dos ensaios 1 ao 13 usando como sinal de referência (Ref) as ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento de cada ensaio (marcadores circulares) e as ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento do ensaio 1 (marcadores triangulares) para as ondas: (a) OC₁₂ e (b) OC₂₁.



Fonte: Autor.

As curvas com os marcadores circulares são as mesmas apresentadas nas figuras 5.1b e 5.2b para as ondas OC₁₂ e OC₂₁, respectivamente. Cada curva foi gerada com um sinal de referência diferente para a execução do CWI. Para o ensaio 1, o sinal de referência foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão imediatamente antes do carregamento do ensaio 1 (Ref=E1). Para o ensaio 2, a referência foi o sinal das ondas emitidas no prisma sem tensão

imediatamente antes do carregamento do ensaio 2 (Ref=E2) e assim por diante para as curvas dos demais ensaios. As curvas com os marcadores triangulares foram geradas usando o mesmo sinal de referência para a execução do CWI, ou seja, o mesmo V_0 para a determinação da variação relativa de velocidade. Este sinal foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão imediatamente antes do carregamento do ensaio 1 (Ref=E1). Por meio das curvas geradas com o mesmo sinal de referência foi possível compreender como o sinal ultrassônico se deslocou no eixo do tempo em função da aplicação dos ciclos de carregamento para um mesmo nível de tensão aplicado no material.

Observou-se nas curvas elaboradas com o mesmo sinal de referência que a curva de um determinado ensaio esteve abaixo da curva do ensaio que o precedeu. Ou seja, para um mesmo valor de tensão, a variação relativa de velocidade num ensaio foi menor do que a do ensaio que o precedeu. Isto significa que o sinal ultrassônico de um determinado ensaio se deslocou para a direita no eixo do tempo em relação ao sinal emitido no ensaio que o precedeu para um mesmo valor de tensão aplicado no prisma. Em outras palavras, para um mesmo valor de tensão aplicada, o tempo de propagação das ondas aumentou com a aplicação dos ciclos. Isto foi atribuído à danificação do material, que aumentou a cada ensaio. Com isto, ocorreu um deslocamento vertical para baixo da curva acustoelástica na figura 5.8. Observou-se que os deslocamentos entre a curva de um ensaio e de outro foram diminuindo até que, a partir de um determinado ensaio, os deslocamentos se tornaram praticamente iguais. Ou seja, existiu um ciclo de carregamento a partir do qual a quantidade de dano gerada no material passou a ser praticamente a mesma. Sabe-se que a aplicação do carregamento no prisma gera variação na velocidade das ondas ultrassônicas (ΔV) e que a causa desta variação é o efeito conjunto constituído pelo efeito acustoelástico (ΔV_{σ}) e pelo efeito do dano (ΔV_D). Se não houvesse a danificação do material ($\Delta V_D = 0$), incrementos iguais de tensão aplicados em diferentes ensaios proporcionariam valores iguais de variação de velocidade das ondas (ΔV), pois estas seriam influenciadas apenas pelo efeito acustoelástico. Consequentemente, as curvas acustoelásticas com os marcadores circulares (figura 5.8) obtidas para os diferentes ensaios apresentariam a mesma inclinação e seriam, portanto, coincidentes. Além disto, as curvas com os marcadores triangulares seriam as mesmas daquelas com os marcadores circulares. No entanto, sabe-se que a aplicação de carregamento no concreto gera nele o surgimento de novas fissuras e o aumento das fissuras pré-existentes, ou seja, danificação. Portanto, para que as curvas acustoelásticas (com os marcadores circulares) de diferentes ensaios no concreto possuam a mesma inclinação e coincidam, a quantidade de dano gerada com a aplicação de cada incremento em um ensaio deve ser a mesma que é gerada quando os mesmos incrementos são aplicados nos ensaios

subsequentes. As curvas geradas com o mesmo sinal de referência mostraram que existe um número de ciclos de carregamento a partir do qual isto ocorre (figura 5.8). Tal fato explica como ocorre a estabilização das curvas (com os marcadores circulares). Ou seja, a estabilização ou repetição na inclinação das curvas acustoelásticas ocorre a partir do momento em que a danificação gerada em diferentes ensaios pela aplicação de um mesmo valor de carga passa a ser a mesma. Então, nas curvas com os marcadores circulares da figura 5.8, a estabilização ficou evidente quando as inclinações entre as curvas dos diferentes ensaios passaram a ser iguais (ou muito semelhantes).

Para as ondas OC_{12} (figura 5.8a), o ciclo de carregamento a partir do qual a quantidade de dano gerada no material passou a ser praticamente a mesma foi o 4. Observou-se que a realização do ensaio 4 gerou uma curva com deslocamentos, em relação à curva do ensaio 3, muito próximos dos deslocamentos da curva do ensaio 5 em relação à curva do ensaio 4 (ver curvas com marcadores triangulares). Entretanto, notou-se um deslocamento maior da curva do ensaio 6 em relação à curva do ensaio 5. Na sequência, os deslocamentos da curva do ensaio 7 em relação à curva do ensaio 6 e da curva do ensaio 8 em relação a do 7 foram praticamente os mesmos. No entanto, a curva do ensaio 9 em relação ao 8 voltou a apresentar um deslocamento maior do que os observados entre as curvas anteriores. As curvas seguintes, dos ensaios 9 ao 13, apresentaram novamente deslocamentos muito próximos entre cada uma delas.

Provavelmente, os deslocamentos maiores encontrados entre as curvas dos ensaios 5 e 6 e entre as curvas dos ensaios 8 e 9 ocorreram por conta da necessidade de mexer nos transdutores posicionados nas faces de extremidade do prisma antes da realização dos ensaios 6 e 9. Para a realização dos 13 ensaios na sequência, era necessário manter os transdutores posicionados nas faces do prisma durante um longo período de tempo. Com o decorrer do tempo, observou-se que o gel acoplante foi perdendo a viscosidade. Com isto, as amplitudes das ondas de cisalhamento sofriam redução e se aproximavam das amplitudes das ondas longitudinais. Como as ondas de cisalhamento só são transmitidas do transdutor para o material em contato com ele por meio de uma substância com certa viscosidade, foi necessário reaplicar o gel acoplante quando era observado que as amplitudes haviam reduzido muito. Com isto, evitou-se que as ondas de cisalhamento deixassem de ser transmitidas para o corpo de prova por causa da perda de viscosidade do acoplante. A perda de viscosidade provavelmente está relacionada com a umidade do ambiente. Pois, no decorrer do trabalho, notou-se que quando a umidade do ar era maior, como em dias chuvosos, a perda da viscosidade ocorria num intervalo de tempo bem menor do que em dias mais secos. A reaplicação do gel acoplante foi feita antes da realização dos ensaios 6 e 9. Para tanto, foi necessário retirar os transdutores de suas

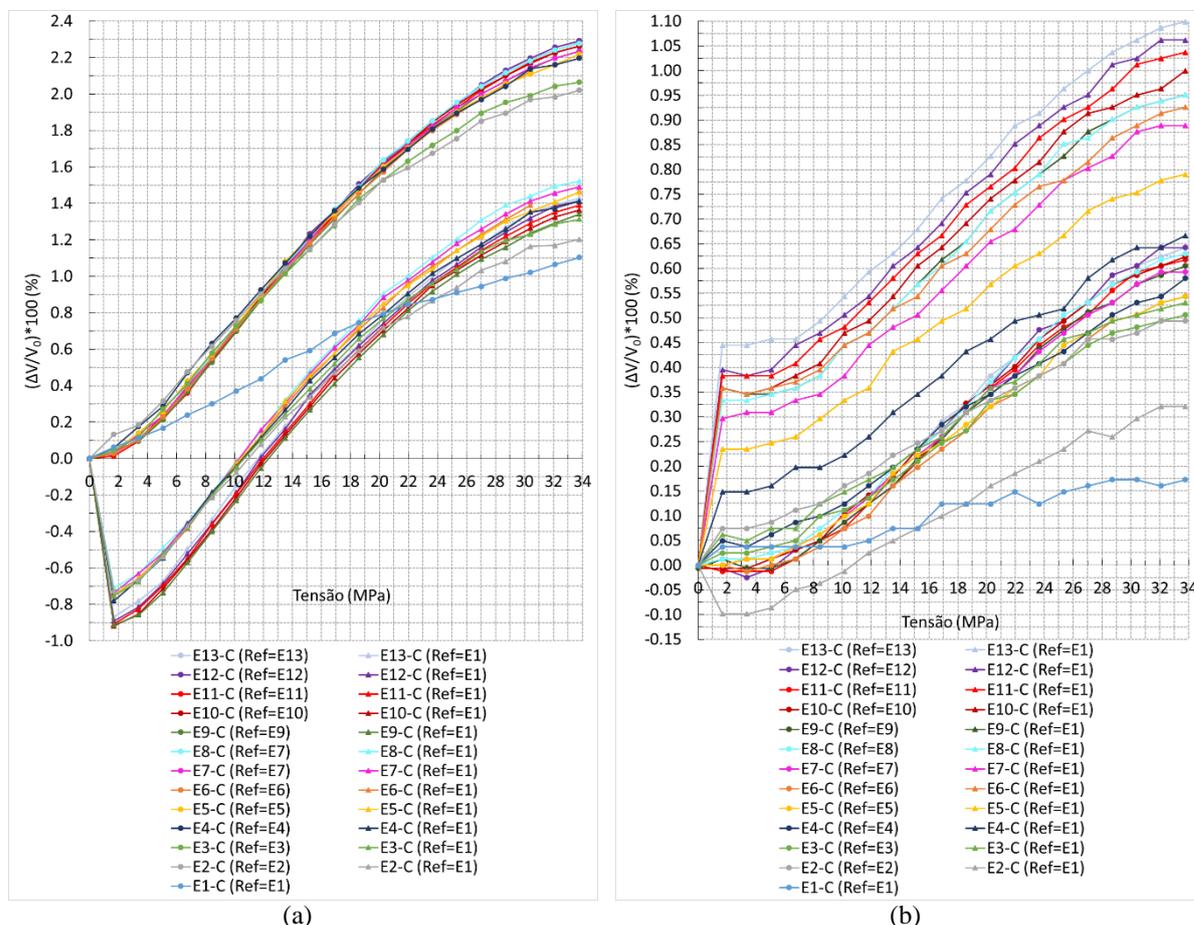
posições, limpar o gel existente, adicionar uma nova quantidade e recolocar os transdutores. Foi observado que exatamente nas curvas dos ensaios 6 e 9 houve um deslocamento maior para baixo em relação ao que ocorre entre as curvas dos ensaios que os precede. Portanto, a necessidade de mexer nos transdutores provavelmente foi a causa deste deslocamento maior. A recolocação de gel nos transdutores pode ter aumentado o tempo de propagação das ondas, pois, geralmente, a nova camada de gel é mais espessa do que a camada antiga, que precisa ser substituída. Como o sinal de referência utilizado para o cálculo da variação relativa da velocidade foi sempre o mesmo, este aumento no tempo de propagação das ondas ao trocar o gel pôde ser observado nos cálculos das variações relativas de velocidade. O fato de os deslocamentos entre as curvas dos ensaios 3 e 4 e entre as curvas dos ensaios 4 e 5, que são muito semelhantes, terem sido um pouco diferentes dos deslocamentos entre cada curva dos ensaios 6 ao 8 e dos ensaios 9 ao 13, pode ter ocorrido justamente por causa da recolocação dos transdutores. Pois, pelas curvas com os marcadores circulares da figura 5.8a, ficou claro que a estabilização ocorreu a partir do ciclo 4.

No caso das ondas OC_{21} , o ciclo a partir do qual o deslocamento vertical para baixo entre as curvas (com marcadores triangulares) passou a ser praticamente o mesmo foi o 9 (figura 5.8b). Ou seja, a partir deste ciclo, a danificação gerada durante o carregamento de cada ciclo foi praticamente a mesma. Também foi necessário trocar o gel acoplante dos transdutores localizados nas faces laterais do prisma ao longo dos ensaios pelos mesmos motivos explicados anteriormente. Isto foi feito antes da realização dos ensaios 7 e 9. Observou-se que justamente nas curvas referentes a estes ciclos ocorreu um deslocamento maior para baixo do que o existente entre as curvas dos ciclos precedentes.

b) Ondas Longitudinais

Também foram geradas curvas da variação relativa de velocidade das ondas longitudinais em função da tensão para a fase de carregamento dos ensaios 1 ao 13, usando diferentes sinais de referência para a realização do CWI (figura 5.9). As curvas com os marcadores triangulares foram geradas utilizando o mesmo sinal de referência: o das ondas emitidas no prisma sem tensão imediatamente antes do carregamento do ensaio 1 (Ref=E1). As curvas com os marcadores circulares foram geradas utilizando diferentes sinais de referência: para cada curva, o sinal de referência foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão imediatamente antes do carregamento do ensaio correspondente. Estas são as mesmas curvas das figuras 5.1a e 5.2a.

Figura 5.9: Variação relativa da velocidade em função da tensão durante o carregamento dos ensaios 1 ao 13 usando como sinal de referência (Ref) as ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento de cada ensaio (marcadores circulares) e as ondas emitidas no prisma sem tensão antes do carregamento do ensaio 1 (marcadores triangulares) para as ondas: (a) OL₁₁ e (b) OL₂₂.



Fonte: Autor.

No caso das curvas geradas com o mesmo sinal de referência (marcadores triangulares), observou-se que a curva de um determinado ensaio esteve acima da curva do ensaio que o precedeu. Ou seja, para um mesmo valor de tensão, a variação relativa da velocidade aumentou entre um ensaio e o seguinte, o que significa que o tempo de propagação das ondas diminuiu conforme a aplicação dos ciclos. Este comportamento das ondas foi o contrário do que era esperado, pois, ele não reflete o efeito do dano, já que este provoca aumento no tempo de propagação das ondas ao invés de redução.

Observou-se que as curvas geradas com o mesmo sinal de referência (marcadores triangulares) se deslocaram para cima com o decorrer dos ciclos de carregamento até que, a partir de um determinado ciclo, este deslocamento passou a ocorrer com valores muito parecidos. Estes ciclos foram o 4 e o 7 para as ondas OL₁₁ e OL₂₂, respectivamente. Isto refletiu na estabilização das curvas geradas com os diferentes sinais de referência (com marcadores circulares), já que a estabilização das ondas OL₁₁ e OL₂₂ por meio destas curvas foi observada

a partir dos ensaios 4 e 7, respectivamente. Como já foi mencionado anteriormente, foi necessário trocar o gel acoplante dos transdutores localizados nas faces de extremidade do prisma antes da realização dos ensaios 6 e 9. Também foi necessário trocar o gel dos transdutores localizados nas faces laterais antes dos ensaios 7 e 9. Este procedimento influenciou nas curvas geradas com o mesmo sinal de referência para estes ensaios. No caso das ondas OL_{22} , a curva do ensaio 7 está deslocada para baixo da curva do ensaio 6, ao invés de estar deslocada para cima. No entanto, a curva do ensaio 8 já volta a subir e está acima da curva do ensaio 7. A curva do ensaio 9, está quase que sobreposta à curva do ensaio 8, ao invés de estar acima dela. Entretanto, as curvas dos ensaios seguintes voltam a subir uma em relação à outra. É como se o fato de mexer nos transdutores tivesse gerado um recuo das curvas dos ensaios seguintes. Este recuo provavelmente está atrelado ao maior tempo de propagação das ondas decorrente de uma camada nova de gel, que é mais espessa do que a anterior que precisou ser substituída. Sobre as ondas OL_{11} , a necessidade de mexer nos transdutores fez com que a curva do ensaio 6 ficasse sobreposta à curva do ensaio 5 ao invés de ficar acima desta. Já a curva do ensaio 9 apresentou um deslocamento grande para baixo em relação à curva do ensaio 8. As curvas dos ensaios seguintes (10 ao 13), voltaram a apresentar o comportamento esperado para as ondas longitudinais, com o deslocamento das curvas para cima com a aplicação dos ciclos.

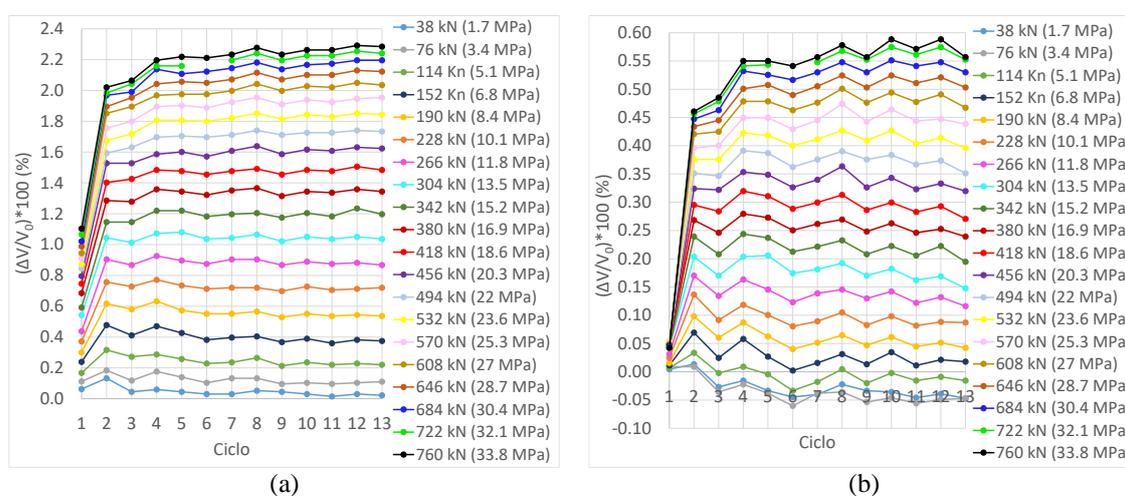
Existem outros fatores que podem afetar a velocidade das ondas além da magnitude da tensão e a danificação no material. Durante o carregamento do prisma ocorre abertura de fissuras, fechamento de vazios pela compressão do material e encurtamento do prisma, enfim, ocorrem mudanças nas propriedades do material. Estes fatores influenciam simultaneamente o comportamento das ondas ultrassônicas e esta influência pode ocorrer com diferentes intensidades em função do tipo de onda ultrassônica. O fechamento de vazios e encurtamento do prisma, por exemplo, têm efeito contrário ao da abertura de fissuras, pois, geram diminuição no tempo de propagação das ondas. Estes fatores podem estar relacionados com o comportamento apresentado pelas ondas longitudinais com o decorrer dos ciclos. Então, existe uma estabilização que está relacionada com todos estes fatores, ou seja, com a mudança nas propriedades do material. Para as ondas de cisalhamento, ficou claro que a danificação é o fator que causa a estabilização deste tipo de onda. Ou seja, os demais fatores não influenciam ou causam uma influência desprezível. No entanto, com os resultados desta pesquisa, ainda não foi possível verificar quais são os fatores que influenciam na estabilização das curvas referentes às ondas longitudinais.

Relação do nível de tensão com a estabilização da curva

Até um determinado valor de tensão aplicado no material, praticamente todas as curvas apresentaram a mesma inclinação (figuras 5.1 e 5.2). Após este determinado valor, uma parte delas passou a apresentar diferentes inclinações e outra parte continuou a apresentar a mesma inclinação (figuras 5.1 e 5.2). Então, a quantidade de ciclos necessária para a estabilização das curvas depende do nível de tensão no qual o material se encontra submetido. Para cargas mais baixas atuantes no elemento estudado, uma quantidade menor de ciclos poderia ser aplicada a fim de obter as curvas estabilizadas. No entanto, quando existe a possibilidade de as cargas atuantes no material serem mais altas, uma quantidade maior de ciclos precisaria ser aplicada. Enfim, aplicando-se a maior quantidade de ciclos, garante-se a estabilização das curvas para ambos os casos. Portanto, neste trabalho, as curvas que apresentaram-se com a mesma inclinação do início ao fim do ensaio, ou seja, ao longo de todo o carregamento, foram as denominadas curvas estabilizadas.

Com base nas figuras 5.1 e 5.2 foram elaboradas as figuras 5.10 e 5.11, que apresentam gráficos da variação relativa da velocidade em função do número de ciclos de carregamento para cada valor de tensão aplicado no prisma para as ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁. A partir destas figuras é possível observar com mais clareza como se comportou a variação relativa de velocidade das ondas emitidas no material submetido a um mesmo nível de tensão em diferentes ciclos de carregamento.

Figura 5.10 – Variação relativa de velocidade em função do número de ciclos de carregamento para um mesmo valor de tensão aplicado no prisma para as ondas: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



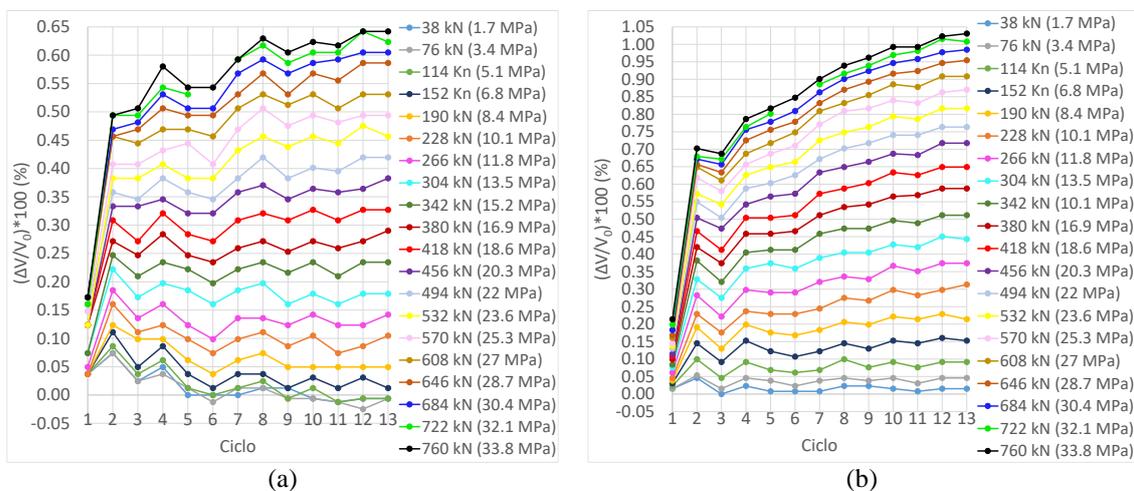
Fonte: Autor.

Na figura 5.10a, referente às ondas OL₁₁, observou-se que entre 1.7 MPa e 3.4 MPa (4.4% do f_{cm}) as ondas apresentaram a mesma variação relativa de velocidade, para um mesmo valor de tensão, em todos os ciclos de carregamento. Consequentemente, na figura 5.1a, as curvas estão sobrepostas neste intervalo de tensões. Entre 5.1 MPa e 13.5 MPa (17.6% do f_{cm}) as ondas possuíram mesma variação relativa de velocidade entre os ciclos 2 e 13 (figura 5.10a), o que gerou curvas destes ciclos muito próximas entre estes valores de tensões na figura 5.1a. Entre 15.2 MPa e 33.8 MPa (44.1% do f_{cm}), as ondas com mesma variação relativa de velocidade foram as emitidas entre os ciclos 4 ao 13 (figura 5.10a). Ou seja, a partir do ciclo 4, as ondas apresentaram a mesma variação relativa de velocidade para iguais valores de tensão ao longo de todo o carregamento do prisma (figura 5.10a). Observou-se na figura 5.1a que, a partir de 15.2 MPa (19.8% do f_{cm}), as curvas dos ensaios 2 e 3 começaram a se afastar das demais. Portanto, as curvas acustoelásticas a partir do ciclo 4 foram as que permaneceram com a mesma inclinação ao longo de todo o carregamento do prisma (figura 5.1a). Então, para tensões maiores, foi necessária a aplicação de um número maior de ciclos para que a variação relativa de velocidade das ondas se mantivesse praticamente constante (figura 5.10a). Isto também foi observado para os demais tipos de ondas.

Para tensões entre 1.7 MPa e 11.8 MPa (15.4% f_{cm}), as ondas OC₁₂ apresentaram valores bastante semelhantes de variação relativa de velocidade entre os ciclos 3 e 13 (figura 5.10b). Na figura 5.1b, verificou-se que, neste intervalo de tensão, as curvas entre os ciclos 3 e 13 apresentaram inclinações muito próximas. Entre 13.5 MPa e 20.3 MPa (26.5% f_{cm}), os valores semelhantes de variação relativa de velocidade das ondas ocorreram a partir do ciclo 2. Notou-se, na figura 5.1b, que, neste intervalo de tensão, a curva do ciclo 2 se aproximou das curvas dos ciclos 3 ao 13. Entre 22 MPa à 33.8 MPa (44.1% f_{cm}), as ondas passaram a apresentar valores de variação relativa de velocidade semelhantes a partir do ciclo 4 (figura 5.10b). Ou seja, a partir do ciclo 4, as ondas apresentaram a mesma variação relativa de velocidade para iguais valores de tensão ao longo de todo o carregamento do prisma. Observou-se na figura 5.1b, que a partir de 22 MPa (28.7% do f_{cm}), as curvas referentes aos ciclos 2 e 3 iniciaram um afastamento das demais curvas, mudando de inclinação. A partir deste valor de tensão, as curvas que continuaram com mesma inclinação foram as referentes aos ciclos 4 ao 13. Portanto, no caso das OC₁₂, as curvas a partir do ciclo 4 também foram as que apresentaram as mesmas inclinações ao longo de todo o carregamento (figura 5.1b).

No casos das ondas OL₂₂ (figura 5.11a) e OC₂₁ (figura 5.11b), observou-se que foi a partir dos ciclos 7 e 9, respectivamente, que as ondas apresentaram a mesma variação relativa de velocidade para iguais valores de tensão ao longo de todo o carregamento do prisma.

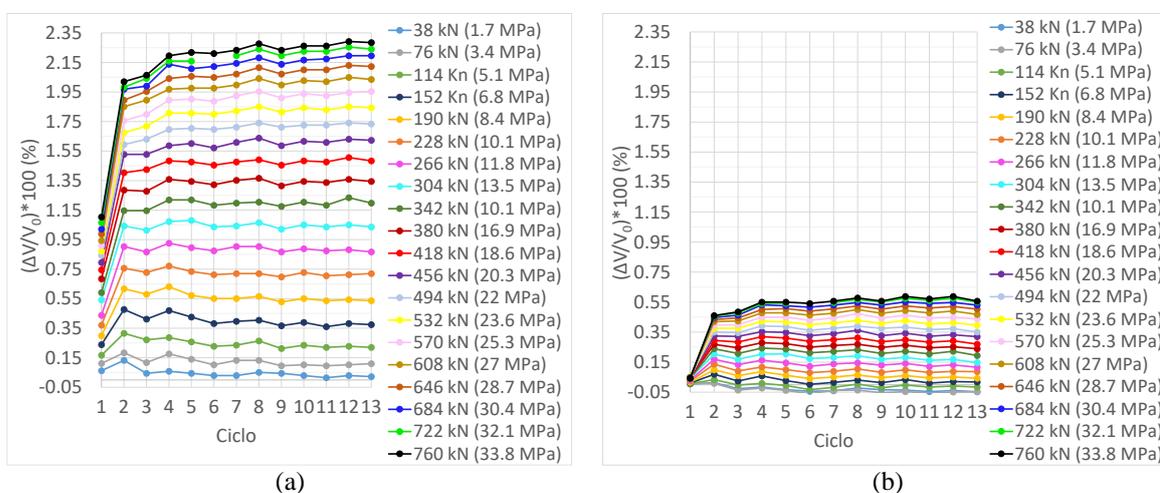
Figura 5.11 – Variação relativa de velocidade em função do número de ciclos de carregamento para um mesmo valor de tensão aplicado no prisma para as ondas: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.



Fonte: Autor.

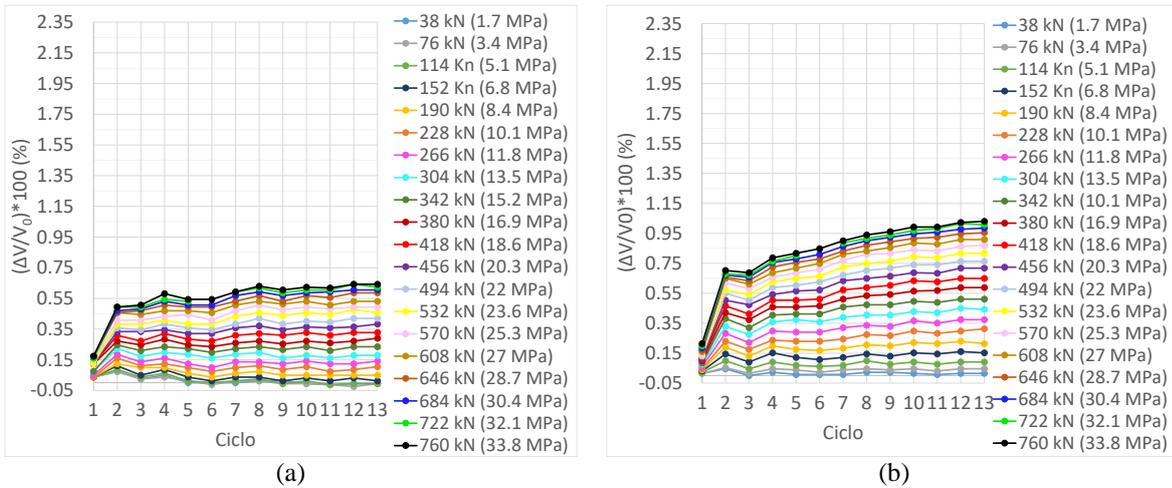
Por meio das figuras 5.12 e 5.13, com mesma escala no eixo vertical, foi possível observar com clareza que, para um mesmo ciclo, o ganho de velocidade ocorrido entre carregamentos consecutivos foi bem maior para as ondas OL₁₁. Além disto, as figuras 5.10 e 5.11 podem gerar uma interpretação errada se não for dada atenção às diferentes escalas dos eixos verticais existentes entre elas. Pois, pode parecer que existe uma dispersão maior entre os pontos de cada curva para as ondas OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁ em relação aos pontos das curvas referentes à OL₁₁ (figura 5.10a). Ao observar as curvas com a mesma escala (figuras 5.12 e 5.13), nota-se que isto não ocorre.

Figura 5.12 – Variação relativa de velocidade em função do número de ciclos de carregamento para um mesmo valor de tensão aplicado no prisma com a mesma escala no eixo vertical para as ondas: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



Fonte: Autor.

Figura 5.13 – Variação relativa de velocidade em função do número de ciclos de carregamento para um mesmo valor de tensão aplicado no prisma para as ondas: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.

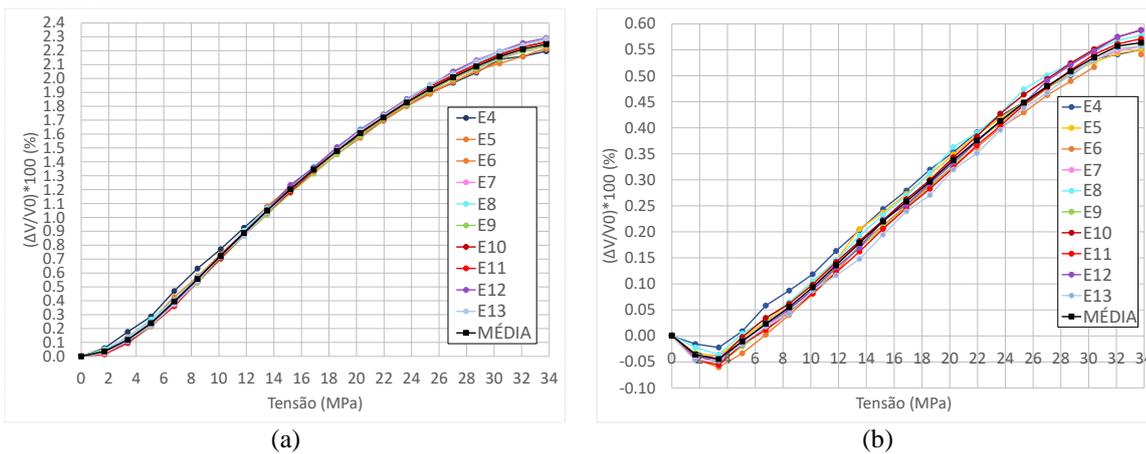


Fonte: Autor.

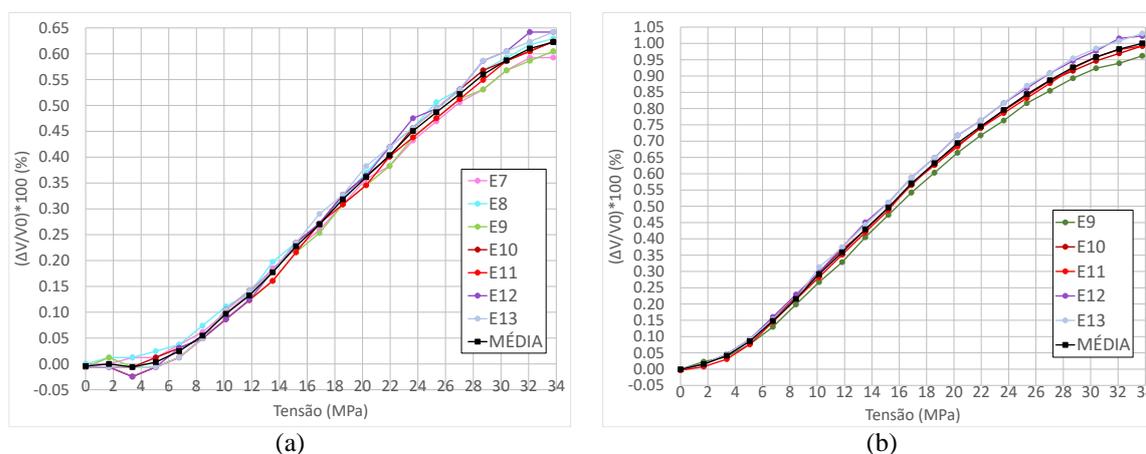
Curva Média

As curvas estabilizadas de um tipo de onda poderiam ser representadas por uma única curva por meio do cálculo de uma curva média, obtida pela média aritmética entre os valores de $\Delta V/V_0$ das curvas estabilizadas para cada valor de tensão aplicado. As figuras 5.14 e 5.15 apresentam as curvas médias juntamente com as estabilizadas para cada tipo de onda.

Figura 5.14 - Curvas estabilizadas e curva média para (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



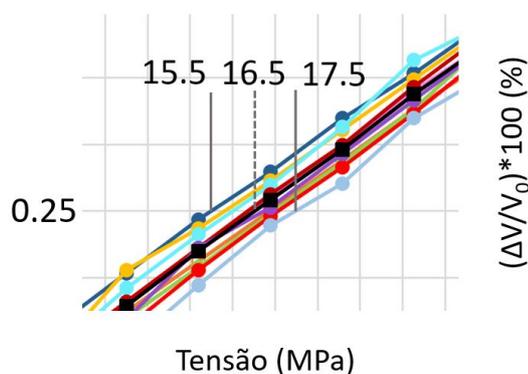
Fonte: Autor.

Figura 5.15 - Curvas estabilizadas e curva média para (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.

Fonte: Autor.

Usando a curva média para representar o comportamento acustoelástico das ondas, o erro que poderia ser obtido na estimativa da tensão a partir de um determinado valor de variação relativa de velocidade seria pequeno. Por exemplo, no caso das ondas OC₁₂, a variação relativa de velocidade de 0.25% correspondeu à tensão de 16.5 MPa pela curva média, 15.5 MPa e 17.5 MPa pelo intervalo de tensões dentro do qual as curvas estabilizadas e a média estão contidas. A figura 5.16 ilustra este exemplo. Adotando 16,5 MPa como sendo a tensão correspondente à 0.25% de $\Delta V/V_0$, o erro seria de no máximo 1MPa, caso os valores corretos fossem um dos extremos do intervalo de tensões. O erro em torno de 1 MPa foi mantido ao longo de toda a curva média com exceção do trecho final, com $\Delta V/V_0$ acima de 0.50%, no qual o erro foi em torno de 2 MPa. No caso das ondas OL₂₂, os erros ao longo da curva foram menores do que 1 MPa e em torno de 1MPa para valores de $\Delta V/V_0$ acima de 0.50%.

Figura 5.16 - Tensões correspondentes à variação relativa de velocidade de 0.25% das ondas OC₁₂, onde: 15.5 MPa e 17.5 MPa são os valores extremos do intervalo de tensões no qual as curvas estão contidas e 16.5 MPa é a tensão obtida pela curva média, em preto.



Fonte: Autor.

Nos ensaios realizados com elementos de concreto, como prismas e cilindros, é importante ter uma única curva que represente o comportamento acustoelástico dos diferentes tipos de onda. Uma maneira de se obter esta curva poderia ser pela determinação da curva média a partir das estabilizadas. Para tanto, foi visto que seria necessário realizar uma grande quantidade de ensaios ultrassônicos a fim de obter as curvas estabilizadas para cada tipo de onda. Neste estudo, foram realizados 13 ensaios. No entanto, quando o número de elementos a serem ensaiados é grande, a realização deste número de ensaios pode ser inviável. O estudo presente mostrou que a estabilização das curvas acustoelásticas é alcançada a partir do ensaio 4 para as ondas OL_{11} e OC_{12} , 7 e 9, para as ondas OL_{22} e OC_{21} , respectivamente. Então, quando a realização de um grande número de ensaios for inviável, uma alternativa seria aplicar, sequencialmente, uma quantidade de ciclos suficiente para gerar a estabilização das curvas e realizar o ensaio ultrassônico no ciclo seguinte. Por exemplo, poderiam ser aplicados 10 ciclos de carregamento na sequência e realizar o ensaio no ciclo 11, garantindo assim a estabilização de todos os tipos de ondas ultrassônicas. Com isto, o comportamento acustoelástico seria representado pela curva do ciclo 11. No desenvolvimento de outros estudos deste trabalho, este foi o procedimento adotado por conta do grande número de elementos a serem ensaiados.

O estudo de estabilização das curvas mostrou que os ensaios acustoelásticos num elemento de concreto não podem ser realizados num ciclo de carregamento qualquer. Pois, o comportamento, ou a inclinação, das curvas acustoelásticas nos primeiros ciclos varia muito. As análises mostraram que existe um número de ciclos mínimo que precisa ser aplicado no concreto para que as curvas acustoelásticas se estabilizem, ou seja, para que o comportamento das curvas passe a ser muito semelhante entre diferentes ensaios realizados no mesmo elemento. Foi observado que a aplicação sequencial de 10 ciclos de carregamento é suficiente para que se obtenha as curvas estabilizadas dos tipos de ondas estudadas ao realizar o ensaio no ciclo seguinte (ciclo 11). A estabilização das curvas é importante para que um ensaio realizado num elemento possa ser reproduzido. É com base nestas curvas que as análises precisam ser realizadas. Portanto, este estudo contribui para auxiliar no desenvolvimento de um procedimento de ensaio confiável para estudar a acustoelasticidade em elementos de concreto.

Foi observado também que a estabilização das curvas acustoelásticas para as ondas de cisalhamento ocorreu quando a quantidade de danos gerada em cada ciclo de carregamento passou a ser praticamente a mesma. Já para as ondas longitudinais, ainda não foi possível identificar neste trabalho quais foram as causas da estabilização das curvas.

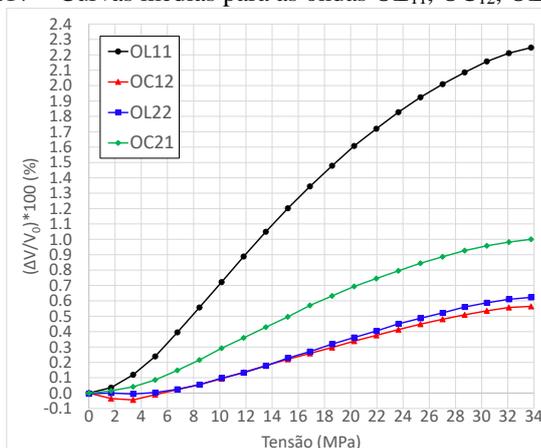
Discussão 3: Não linearidade inicial

De acordo com a equação 2.58, a relação entre a variação relativa de velocidade das ondas e a tensão no material é linear. No entanto, as curvas acustoelásticas obtidas experimentalmente para as ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁ (figuras 5.1 e 5.2) mostraram que o trecho inicial destas curvas pode ser não linear. Este trecho portanto, está em desacordo com a equação da teoria da acustoelasticidade. Foi observado que a não linearidade inicial não ocorreu nas curvas referentes ao primeiro ciclo realizado no prisma na fase de carregamento, ciclo 1 (ensaio 1 ou E1), conforme as figuras 5.1 e 5.2. O trecho não linear no início da curva de carregamento passou a existir a partir do segundo ciclo. Esta observação indica que a ocorrência desta não linearidade está relacionada com os danos gerados com a aplicação do primeiro ciclo de carregamento no concreto. Os efeitos destes danos na velocidade das ondas seriam observados ao realizar os ensaios nos ciclos seguintes.

Discussão 4: Sensibilidade à tensão para os diferentes tipos de onda

Na figura 5.17, são apresentadas as curvas médias dos quatro tipos de ondas, obtidas a partir das estabilizadas. Como já observado em trabalhos anteriores (LILLAMAND et al., 2010, BOMPAN; HAACH, 2018), as ondas cujas direções de propagação e de polarização foram a mesmas da direção de aplicação do carregamento, OL₁₁, mostraram maior sensibilidade à tensão, uma vez que, a inclinação da curva foi maior para este tipo de onda. Na sequência, as ondas mais sensíveis à tensão foram as OC₂₁. As ondas OL₂₂ e as OC₁₂ apresentaram curvas com inclinações muito próximas, com as curvas das OL₂₂ ligeiramente mais inclinadas do que as das OC₁₂.

Figura 5.17 – Curvas médias para as ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁.



Fonte: Autor.

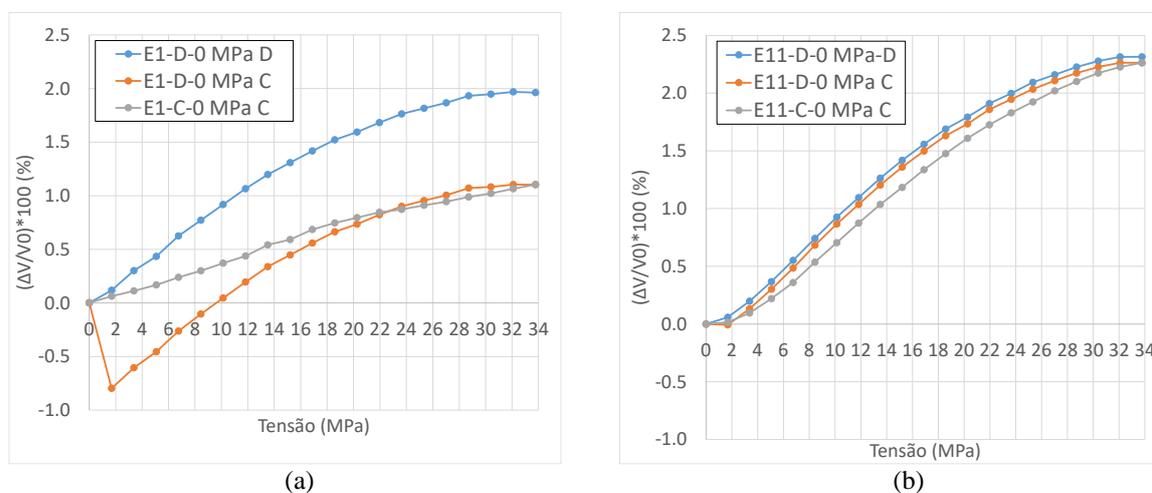
5.2.2 Prisma C4P1– Análises para a fase de descarregamento

Discussão 1: Análise da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas durante o descarregamento do prisma

As figura 5.18 mostra curvas da variação relativa de velocidade das ondas OL_{11} em função da tensão para as fases de carregamento e descarregamento do prisma nos ensaios 1 e 11. As curvas para a fase de descarregamento foram geradas de duas maneiras. Na primeira, para cada ensaio, o sinal de referência utilizado foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão imediatamente antes de iniciar a fase de carregamento deste ensaio. Este sinal foi denominado 0MPa-C e as curvas geradas com ele foram denominadas E1-D_0MPa-C e E11-D_0MPa-C, para os ensaios 1 e 11, respectivamente. Na segunda maneira de gerar as curvas de descarregamento, para cada ensaio, o sinal de referência foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão logo após o final da fase de descarregamento deste ensaio. Este sinal foi denominado 0 MPa-D e as curvas geradas com ele, E1-D_0MPa-D e E11-D_0MPa-D, para os ensaios 1 e 11, respectivamente. As curvas referentes à fase de carregamento foram geradas de uma única maneira: para um determinado ensaio, estas curvas foram obtidas usando como referência o sinal das ondas emitidas no prisma sem tensão imediatamente antes do início do carregamento deste ensaio. O sinal de referência foi aquele denominado 0 MPa-C e as curvas geradas com ele foram chamadas de E1-C_0MPa-C e E11-C_0MPa-C para os ensaios 1 e 11, respectivamente.

Todas estas curvas também foram geradas para os demais ensaios com as ondas OL_{11} e apresentaram o mesmo comportamento das curvas referentes ao ensaio 11. O mesmo foi verificado para as curvas dos ensaios 2 ao 13 das ondas OC_{12} , OL_{22} e OC_{21} . As curvas do ensaio 1 para estes tipos de onda também foram muito semelhantes às curvas do ensaio 1 das ondas OL_{11} . Portanto, neste capítulo, só são apresentadas as figuras com as curvas dos ensaios 1 e 11 para as ondas OL_{11} . No apêndice B são apresentadas as figuras dos ensaios 1 ao 13 para todos os tipos de onda.

Figura 5.18 -Variação relativa da velocidade das ondas OL_{11} em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 1 e (b) 11.

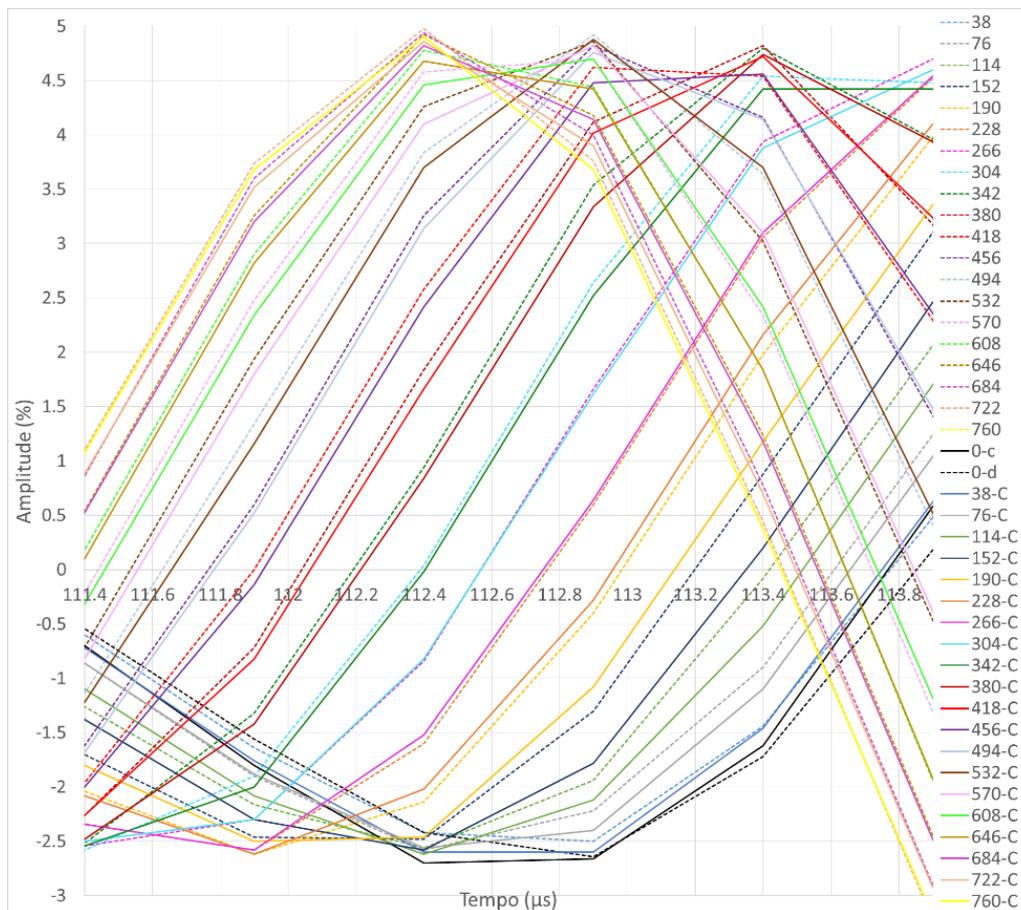


Fonte: Autor.

Neste trabalho, para representar a fase de descarregamento de um ensaio num prisma, as curvas utilizadas foram aquelas cujo sinal de referência foi o obtido no prisma sem tensões no final do descarregamento do ensaio (0 MPa-D). No entanto, no presente estudo, a curva da fase de descarregamento gerada com referência no sinal obtido no prisma sem tensões no início do carregamento (0 MPa-C) contribuiu para melhor compreender o comportamento das ondas durante o descarregamento do material, como será visto nas discussões a seguir.

No ensaio 11, a curva referente ao descarregamento obtida com o sinal de referência de 0 MPa-C (em laranja), está acima da curva correspondente ao carregamento (em cinza), conforme figura 5.18. Como estas curvas foram geradas utilizando o mesmo sinal de referência (0 MPa-C), ou seja, o mesmo V_0 , concluiu-se que as ondas emitidas para um mesmo valor de tensão durante as fases de carregamento e descarregamento apresentaram diferentes velocidades de propagação. A velocidade foi maior durante o descarregamento. A figura 5.19 ilustra este fato. Nela, estão apresentados os sinais ultrassônicos no eixo do tempo obtidos para cada valor de carregamento atuante no prisma durante ambas as fases do ensaio 11. As linhas cheias representam os sinais obtidos no carregamento e as tracejadas, os sinais obtidos no descarregamento. Esta figura mostra um trecho dos sinais contidos dentro da janela de análise para a realização do CWI.

Figura 5.19 - Sinais ultrassônicos das ondas OL₁₁ obtidos para cada valor de carregamento atuante no prisma durante as fases de carregamento e descarregamento do ensaio 11. As legendas indicam a força aplicada em kN.



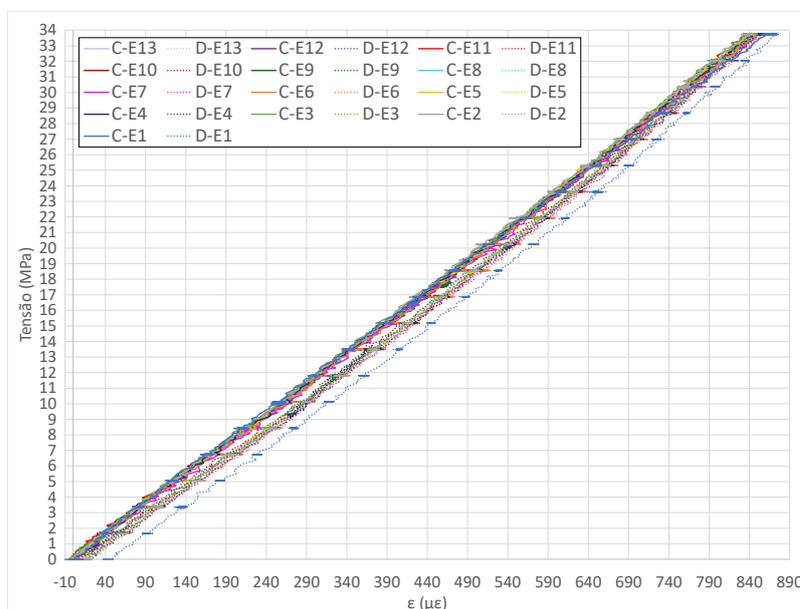
Fonte: Autor.

Na figura 5.19, observou-se que, para um mesmo nível de tensão, o sinal no descarregamento esteve à esquerda do sinal no carregamento, ou seja, que o tempo de propagação foi menor no descarregamento (ou que a velocidade foi maior). Esperava-se o contrário, que a velocidade no descarregamento fosse menor do que no carregamento para um mesmo valor de tensão. A quantidade de dano gerada no prisma durante o ensaio aumenta com a aplicação dos incrementos de carga durante a fase de carregamento. O dano máximo é alcançado quando o último incremento de carga é aplicado nesta fase, ou seja, quando o carregamento atinge o valor máximo, de 760 kN. Durante o descarregamento, não são gerados novos danos. Conforme a carga vai sendo retirada, ocorre a diminuição na abertura das fissuras que foram geradas com o carregamento máximo de 760 kN. Ou seja, a quantidade de fissuras no material durante o descarregamento é constante e a abertura destas fissuras vai diminuindo com a retirada da carga. Então, para um mesmo valor de tensão no prisma, a quantidade de danos existente no material na fase de descarregamento seria maior do que na fase de

carregamento. Conseqüentemente, a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas seria menor durante o descarregamento do prisma. No entanto, foi observado o contrário.

A explicação para isto está no comportamento da curva da tensão em função da deformação em conjunto com a teoria da acustoelasticidade. A curva da tensão em função da deformação é diferente nas fases de carregamento e descarregamento, conforme mostra a figura 5.20, na qual estão apresentadas as curvas para ambas as fases dos ensaios 1 ao 13. As curvas com linha cheia e tracejada representam as fases de carregamento e de descarregamento, respectivamente.

Figura 5.20- Tensão em função da deformação durante o carregamento e o descarregamento do prisma dos ensaios 1 ao 13.



Fonte: Autor.

Na figura 5.20, observou-se que, para um mesmo valor de tensão, a deformação do material foi maior no descarregamento. A teoria da acustoelasticidade foi formulada com base em deformações e não em tensões (HUGUES; KELLY, 1953). Ou seja, o equacionamento se desenvolveu ao relacionar as velocidades das ondas ultrassônicas com as deformações do material. Sendo assim, as velocidades são dependentes das deformações. Após desenvolver a formulação desta maneira, as equações foram reescritas em termos de tensão ao relacionar as deformações com as tensões por meio da Lei de Hooke. Sendo assim, mesmo que a tensão aplicada seja a mesma para as fases de carregamento e descarregamento, se as deformações geradas forem diferentes, as velocidades também serão, de acordo com a teoria da acustoelasticidade. Assim, explica-se as velocidades das ondas ultrassônicas serem maiores no descarregamento do que no carregamento para um mesmo nível de tensão aplicado. Além disto,

verifica-se que, durante o descarregamento, o efeito da danificação, gerada ao longo do carregamento de um determinado ensaio, foi menor do que o efeito da deformação. Com isto, apesar de a danificação no material ser maior no descarregamento do que no carregamento para um mesmo nível de tensão aplicado, a velocidade das ondas resulta maior no descarregamento.

Ao final do descarregamento do ensaio 11, quando o prisma estava sem tensão aplicada e as deformações se tornaram nulas novamente, o único fator que influenciou o tempo de propagação das ondas foi a danificação do material. Observou-se, então, que as velocidades de propagação das ondas foram menores no prisma sem tensão ao final do descarregamento do que no prisma sem tensão no início do carregamento (figura 5.19). Na figura 5.19, os sinais emitidos no prisma sem tensão após a fase de descarregamento (linhas pretas tracejadas) estão à direita no eixo do tempo daqueles emitidos no prisma sem tensão antes da fase de carregamento (linhas pretas contínuas). Além disto, a análise das figuras 5.3 e 5.4 mostrou que as velocidades das ondas emitidas no prisma logo após o término do descarregamento de um ensaio são menores do que as velocidades das ondas emitidas imediatamente antes do carregamento deste ensaio.

No ensaio 1, ao contrário do que foi observado para o ensaio 11, a curva referente ao descarregamento obtida com o sinal de referência de 0 MPa-C esteve abaixo da curva correspondente ao carregamento durante a maior parte do ensaio (figuras 5.18a). Ao longo do carregamento do prisma no ensaio 1, quando as cargas foram aplicadas pela primeira vez no material, os danos gerados foram bem maiores do que os gerados com o carregamento do prisma nos ensaios seguintes, como foi verificado nas figuras 5.3 e 5.4. Então, para um determinado valor de tensão no prisma, a quantidade de danos existente no material no descarregamento do ensaio 1 provavelmente foi grande o suficiente para fazer com que o efeito deste dano na velocidade de propagação das ondas fosse maior do que o efeito da deformação, a qual foi maior no descarregamento, conforme figura 5.20. Com isto, as ondas ultrassônicas emitidas no prisma durante o descarregamento apresentaram menor velocidade propagação do que as ondas emitidas durante o carregamento para um mesmo valor de tensão no ensaio 1.

No ensaio 11, a curva referente ao descarregamento obtida com o sinal de referência de 0 MPa-D (em azul) ficou acima da curva correspondente ao descarregamento gerada usando o sinal de referência de 0 MPa-C (em laranja), conforme figura 5.18. Ambos os tipos de curva foram gerados utilizando os mesmos sinais ultrassônicos emitidos no prisma sob tensão não nula para a realização do CWI. Ou seja, na figura 5.19, as linhas tracejadas foram os sinais ultrassônicos emitidos no prisma sob tensão utilizados nos dois casos. O sinal de referência é que foi diferente. Como as ondas emitidas no prisma sem tensão logo após o descarregamento

(sinal de referência 0 MPa-D) apresentaram menor velocidade do que as ondas emitidas no prisma sem tensão imediatamente antes do carregamento (sinal de referência 0 MPa-C), a variação de velocidade calculada em relação ao primeiro sinal foi maior.

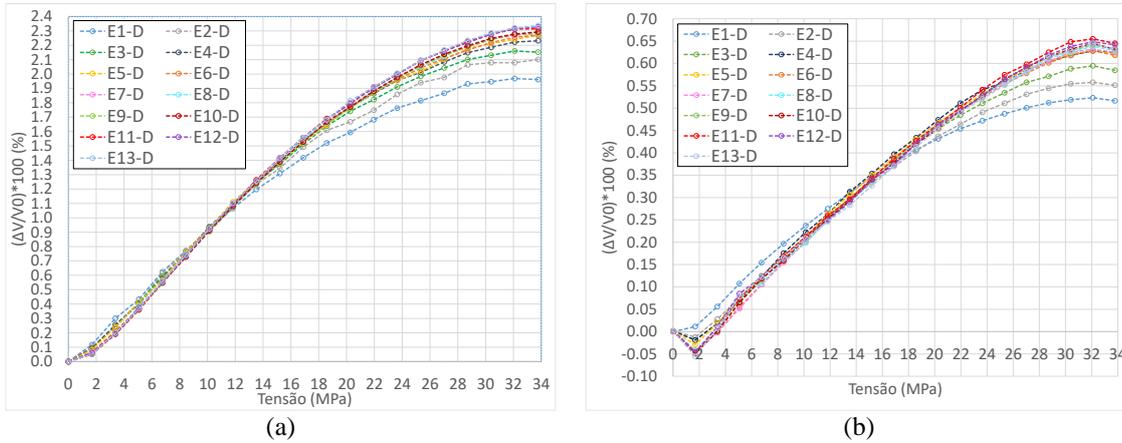
Foi visto que, durante o carregamento do prisma, cada incremento de carga gera novas fissuras e o aumento da abertura das fissuras pré-existentes, gerando influência na velocidade de propagação das ondas. Ao longo do descarregamento, não são geradas novas fissuras, ou seja, a quantidade de fissuras é constante e é aquela gerada ao final do carregamento do prisma. Então, durante o descarregamento, a velocidade de propagação das ondas recebe a influência do dano gerado ao final da fase de carregamento. Portanto, a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas é influenciado pelo dano em ambas as fases do ensaio.

Entre as curvas acustoelásticas para a fase de carregamento e descarregamento, geradas usando os sinais 0 MPa-C e 0 MPa-D, respectivamente, como referência para o CWI, a curva do descarregamento apresentou maior efeito acustoelástico (ver figuras 5.18). Portanto, neste quesito, esta curva seria mais favorável para ser utilizada nos estudos sobre acustoelasticidade no concreto. Este é um dos motivos para a utilização desta curva em outros estudos sobre o efeito acustoelástico em prismas de concreto que serão apresentados mais adiante neste trabalho.

Discussão 2: Estabilização da curva acustoelástica na fase de descarregamento

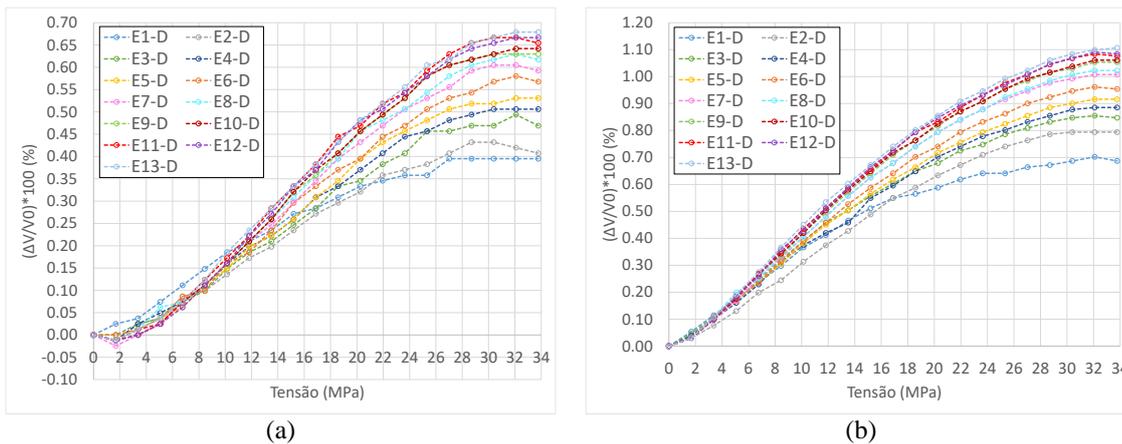
Os gráficos da variação relativa da velocidade das ondas ultrassônicas ($\Delta V/V_0$) em função da tensão aplicada (σ) no prisma durante a fase de descarregamento dos ensaios 1 ao 13 estão apresentados na figura 5.21 para as ondas OL₁₁ e OC₁₂ e na figura 5.22 para as ondas OL₂₂ e OC₂₁. O sinal de referência (V_0) usado no CWI para a elaboração do gráfico de um determinado ensaio foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão logo após o fim da fase de descarregamento deste ensaio (sinal 0 MPa-D).

Figura 5.21- Variação relativa de velocidade em função da tensão na fase de descarregamento para: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



Fonte: Autor.

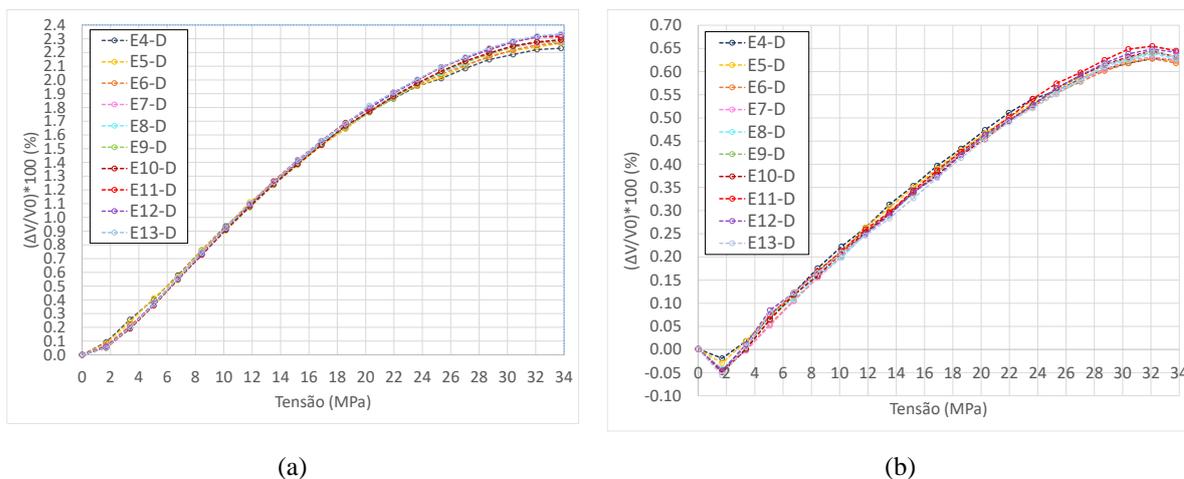
Figura 5.22- Variação relativa de velocidade em função da tensão na fase de descarregamento para: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.



Fonte: Autor.

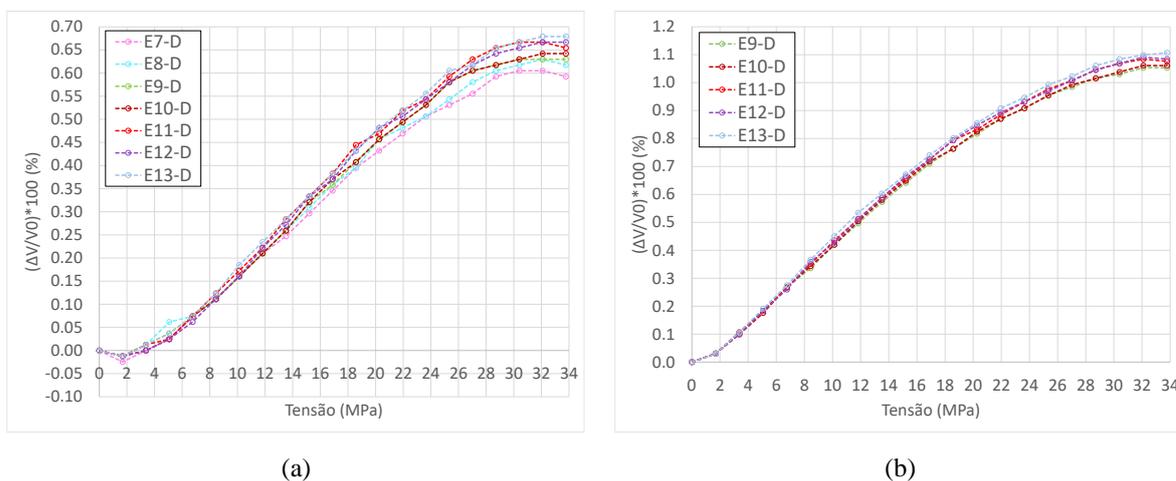
Observou-se que a estabilização da curva acustoelástica na fase de descarregamento ocorreu a partir do ensaio 4 para as ondas OL₁₁ e OC₁₂ e a partir dos ensaios 7 e 9 para as ondas OL₂₂ e OC₂₁, respectivamente. A partir destes ensaios, a inclinação das curvas dos ensaios subsequentes foi praticamente a mesma. As figuras 5.23 e 5.24 apresentam apenas as curvas estabilizadas para as ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁. Portanto, a aplicação sequencial de 10 ciclos de carregamento e descarregamento no material foi suficiente para que fossem obtidas curvas acustoelásticas estabilizadas para ambas as fases ao se realizar o ensaio no ciclo seguinte (ciclo 11).

Figura 5.23- Curvas estabilizadas para: (a) OL₁₁ (ensaios 4 ao 13) e (b) OC₁₂ (ensaios 4 ao 13).



Fonte: Autor.

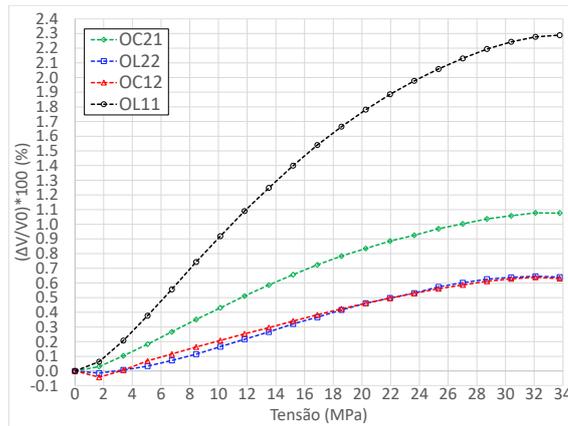
Figura 5.24 - Curvas estabilizadas para: (a) OL₂₂ (ensaios 7 ao 13) e (b) OC₂₁ (ensaios 9 ao 13).



Fonte: Autor.

A figura 5.25 apresenta as curvas médias elaboradas a partir das estabilizadas. Observou-se que as ondas OL₁₁ apresentaram maior ganho de velocidade com o aumento de tensão de compressão no material. Ou seja, elas foram as mais sensíveis à tensão. Na sequência, as ondas mais sensíveis à tensão foram as OC₂₁. As ondas OL₂₂ e OC₁₂ apresentaram praticamente a mesma sensibilidade à tensão. A mesma sensibilidade à tensão das ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁ foi observada na fase de carregamento.

Figura 5.25- Curvas médias para as ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁ para a fase de descarregamento.

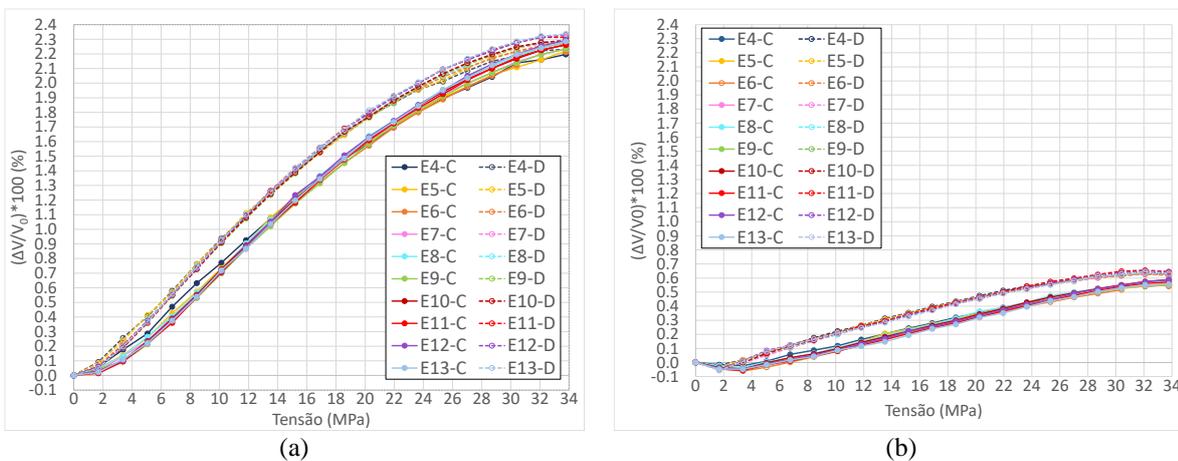


Fonte: Autor.

Discussão 3: Comparação entre as curvas acustoelásticas nas fases de carregamento e descarregamento

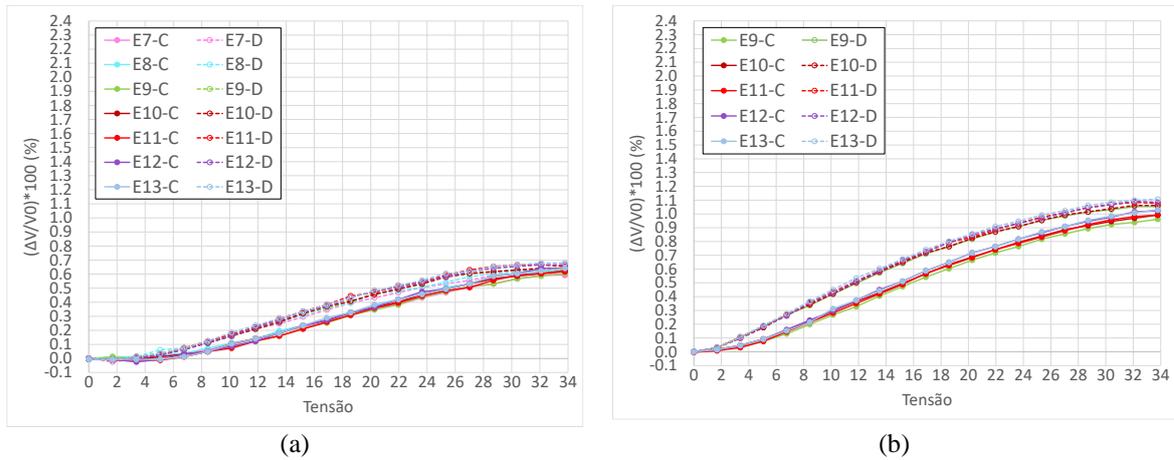
As figuras 5.26 e 5.27 apresentam as curvas acustoelásticas estabilizadas para as fases de carregamento e descarregamento das ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁. As curvas com linhas contínuas e tracejadas são referentes às fases de carregamento e descarregamento, respectivamente. Para gerar a curva para a fase de carregamento de um determinado ensaio, o sinal de referência utilizado no CWI foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão imediatamente antes do início desta fase. Para gerar a curva para a fase de descarregamento do ensaio, o sinal de referência foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão logo após o término desta fase.

Figura 5.26- Curvas estabilizadas para as fases de carregamento e descarregamento: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



Fonte: Autor.

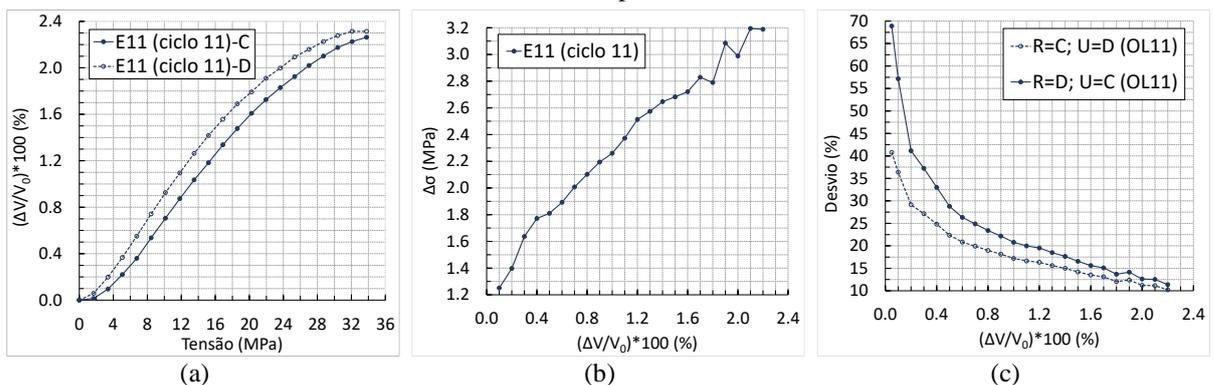
Figura 5.27- Curvas estabilizadas para as fases de carregamento e descarregamento: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.



Fonte: Autor.

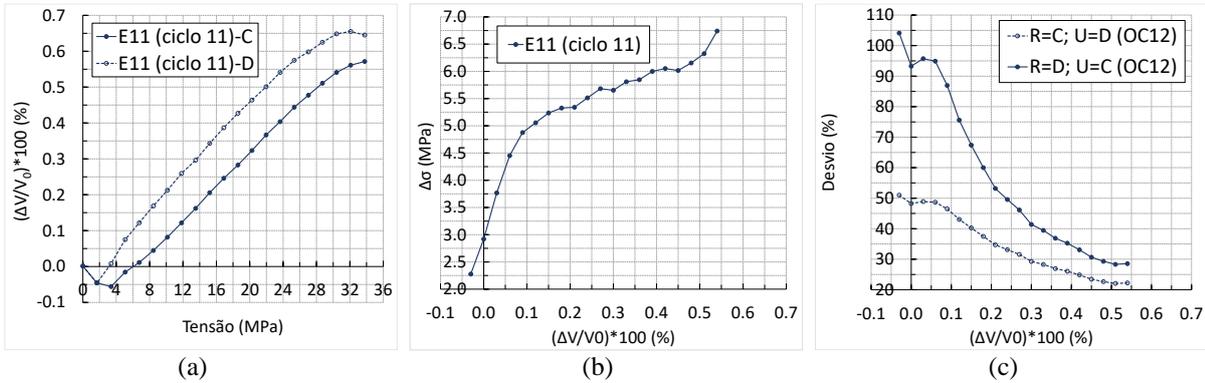
Como já discutido anteriormente, existe uma diferença com relação a taxa de ganho de velocidade em função da tensão para ambas as fases. No descarregamento, esta taxa foi maior e, conseqüentemente, as curvas se apresentaram acima daquelas correspondentes à fase de carregamento. Portanto, dependendo da fase em que o elemento de concreto estiver trabalhando, as velocidades das ondas ultrassônicas ao se propagarem através dele estarão associadas à diferentes valores de tensão no material. Para um determinado valor de velocidade, a tensão correspondente será maior quando o elemento estiver na fase de carregamento. Para conhecer de quanto é a diferença de tensões que um mesmo valor de velocidade forneceria por meio das curvas de carregamento e descarregamento de um mesmo ensaio e quanto seria o desvio (em porcentagem) que esta diferença representaria com relação ao valor real da tensão existente no material foram elaboradas as figuras 5.28 à 5.31 referentes às ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁.

Figura 5.28- Gráficos para as ondas OL₁₁: (a) Curvas acustoeásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.



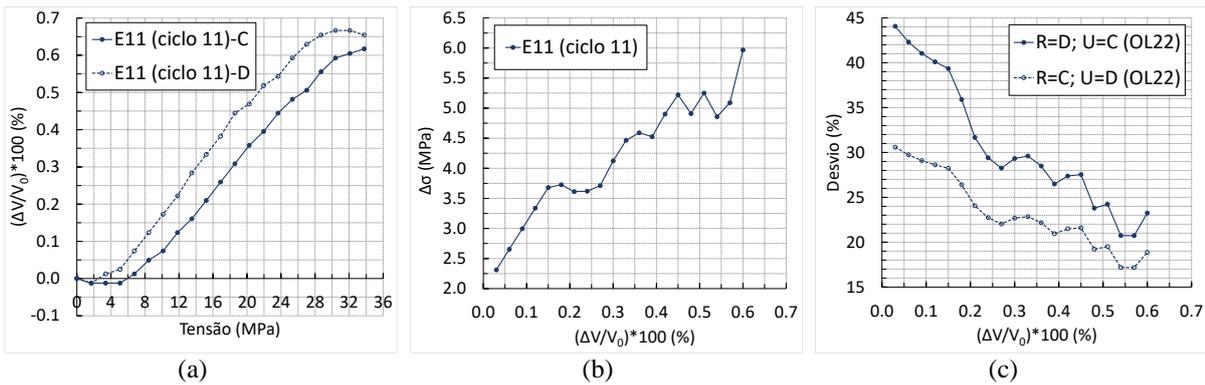
Fonte: Autor.

Figura 5.29- Gráficos para as ondas OC₁₂: (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.



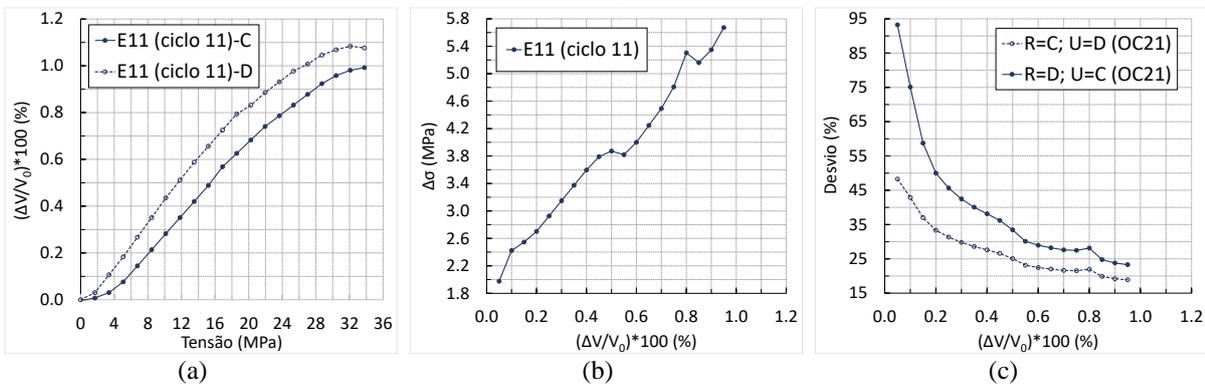
Fonte: Autor.

Figura 5.30- Gráficos para as ondas OL₂₂: (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.



Fonte: Autor.

Figura 5.31- Gráficos para as ondas OC₂₁: (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.



Fonte: Autor.

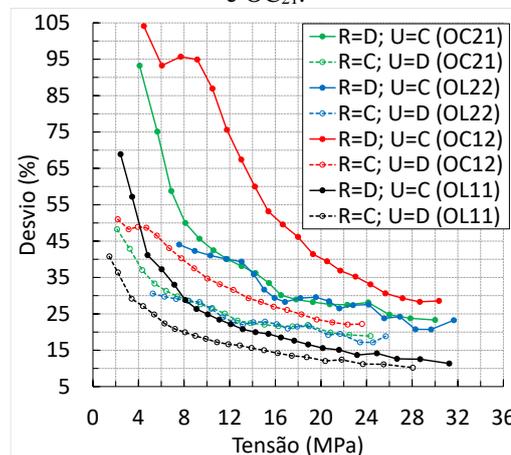
Nas figuras 5.28a à 5.31a, foram apresentadas as curvas de carregamento e descarregamento do prisma referentes ao ciclo 11 (ensaio 11). As curvas deste ensaio foram as escolhidas para representar o comportamento acustoelástico do material, pois, como já foi observado, a aplicação sequencial de 10 ciclos de carregamento e descarregamento no concreto é suficiente para garantir que a curva obtida a partir do ciclo seguinte (ciclo 11) esteja estabilizada para os quatro tipos de ondas, OL_{11} , OC_{12} , OL_{22} e OC_{21} . A diferença nos valores das tensões ($\Delta\sigma$) obtidas para um mesmo valor de variação relativa de velocidade ($\Delta V/V_0$) por meio das curvas de ambas as fases das figuras 5.28a à 5.31a foram apresentadas nas figuras 5.28b à 5.31b. Por exemplo, na figura 5.28a, quando $\Delta V/V_0$ é 1.2%, as tensões correspondentes nas curvas de carregamento e descarregamento do ciclo 11 foram de 15.4 MPa e 12.9 MPa, respectivamente. Ou seja o $\Delta\sigma$ foi de 2.5 MPa. Então, a figura 5.28b indica que quando o $\Delta V/V_0$ foi 1.2%, o $\Delta\sigma$ entre as curvas de carregamento e descarregamento foi de 2.5 MPa. Por sua vez, a figura 5.28c mostra o valor do desvio, em porcentagem, que o $\Delta\sigma$ representa em relação à tensão real atuante no material. A tensão real pode ser a correspondente à fase de carregamento ou à de descarregamento. Então, este desvio foi calculado supondo duas possíveis situações. Em uma delas, admitiu-se que o elemento de concreto encontra-se carregado e na fase de carregamento, mas, a curva utilizada para relacionar os valores de velocidade das ondas ao se propagarem através dele com a tensão foi a curva da fase descarregamento. Então, neste caso, a curva que relaciona as velocidades com a tensão real atuante é a de carregamento, mas, a utilizada foi a de descarregamento. Deste modo, existe um $\Delta\sigma$ entre o valor de tensão calculado com a curva de descarregamento e o valor real dado pela curva de carregamento. O desvio que este $\Delta\sigma$ representa, em relação ao valor real de tensão atuante, foi calculado com base na tensão fornecida pela curva de carregamento. O desvio calculado deste modo está representado pela curva “R=C; U=D”. Ou seja, quando a curva real (R) é dada pela curva da fase de carregamento (C), mas a curva utilizada (U) foi a da fase de descarregamento (D). Na outra situação, admitiu-se que o elemento de concreto estava carregado e na fase de descarregamento. No entanto, foi utilizada a curva da fase de carregamento para relacionar as velocidades das ondas emitidas através dele com a tensão. Neste caso, também existe um $\Delta\sigma$ entre o valor de tensão calculado usando a curva de carregamento e o valor real de tensão que é dado pela curva de descarregamento. Então, o desvio de $\Delta\sigma$ em relação a tensão real foi calculado com base nas tensões fornecidas pela curva de descarregamento, que são as reais. A curva que mostra os desvios calculados desta maneira é a “R=D; U=C”. Isto é, quando a curva real (R) é a da fase de descarregamento (D), mas, a curva utilizada (U) foi a da fase de carregamento (C).

Observou-se pelas figuras 5.28c à 5.31c que o desvio foi menor quando utilizou-se a curva da fase de descarregamento para se fazer a avaliação das tensões, mas, a curva real era a da fase de carregamento. Isto permite concluir que, numa estrutura real, quando não se sabe se o elemento estrutural a ser avaliado com o ultrassom se encontra na fase de carregamento ou de descarregamento, o desvio obtido no valor da tensão calculada, ao utilizar a curva acustoelástica da fase errada, será menor quando a curva utilizada for a da fase de descarregamento. Sendo assim, este estudo contribui para avançar um pouco mais no que diz respeito à avaliação de tensões por meio das velocidades das ondas ultrassônicas em elementos de concreto *in situ*.

Como, na prática, os desvios no cálculo das tensões seriam menores ao usar a curva do descarregamento, o uso deste curva seria o mais adequado na análise de tensões. Então, seria interessante que os estudos sobre o efeito acustoelástico no concreto também fossem direcionados para a fase de descarregamento. Além disto, foi visto que a curva desta fase proporciona maior efeito acustoelástico, o que também é favorável na análise de tensões. Por conta disso, os estudos sobre acustoelasticidade em prismas de concreto que serão apresentados mais adiante foram realizados para a fase de descarregamento dos prismas.

Verificou-se nas figuras 5.28c à 5.31c, que os desvios diminuiriam com o aumento no $\Delta V/V_0$, ou seja, com o aumento da tensão aplicada nos prismas. Portanto, quanto mais carregado esteve o elemento de concreto, menor foi o desvio relativo no valor da tensão (figuras 5.28c à 5.31c). A figura 5.32 mostra isto com mais clareza. Nela, é apresentado o valor do desvio (%) ao usar a curva acustoelástica para a fase errada em função da tensão estimada no prisma. A tensão estimada é a obtida por meio da curva acustoelástica utilizada (U). Ficou evidente que quanto maior foi o valor da tensão, menor foi o desvio existente no cálculo das tensões.

Figura 5.32- Desvio, em porcentagem, em função da tensão estimada no prisma para as ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁.



Fonte: Autor.

Uma das situações em que o ultrassom poderia ser aplicado é na avaliação de tensões em estruturas de concreto em situações críticas, em que os níveis de tensões atuantes nos elementos estruturais estão acima dos previstos em projetos. Por exemplo, quando a estrutura foi subdimensionada e é necessário fazer um reforço estrutural. Ou, quando houve a perda de elementos estruturais o que acarretou numa redistribuição de esforços e, conseqüentemente, na sobrecarga dos elementos estruturais restantes. Enfim, existem várias situações em que os níveis de tensão nos elementos podem estar altos, acima do previsto em projeto. Nestes casos, os desvios nos valores das tensões que poderiam ser obtidos ao se fazer a avaliação com o ultrassom seriam menores.

Por meio da figura 5.32, verificou-se que as ondas OL₁₁ foram as que acarretaram em menores desvios no valor estimado das tensões ao utilizar a curva acustoelástica para a fase errada (carregamento ou descarregamento). Em seguida, as ondas que forneceram tensões com menores desvios foram as OC₂₁ e as OL₂₂. Neste caso, os desvios foram praticamente os mesmos. As ondas que proporcionaram maiores desvios na estimativa das tensões foram as OC₁₂. Portanto, este estudo mostrou que o tipo de onda que forneceria o menor desvio no valor estimado das tensões seria as ondas OL₁₁. Deste modo, neste contexto, este seria o tipo de onda mais adequado na avaliação de estruturas de concreto *in situ* usando o ultrassom.

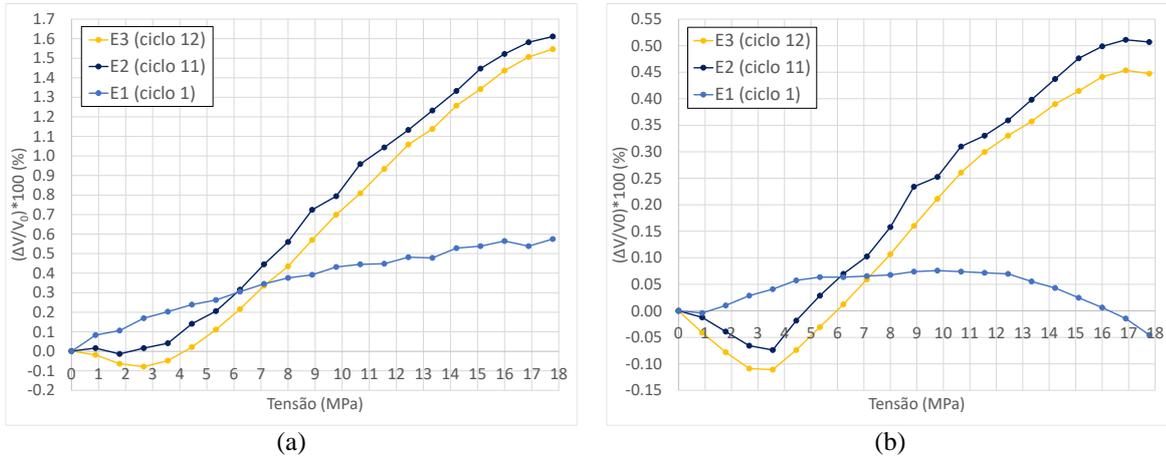
Este estudo aumenta o conhecimento do comportamento acustoelástico do concreto e apresenta alternativas para se obter uma avaliação de tensões mais confiável com o uso do ultrassom em elementos de concreto *in situ*.

5.2.3 Prisma C2P1 – Análises para a fase de carregamento

Discussão 1: Diferença entre a curva acustoelástica do primeiro ensaio e dos demais ensaios.

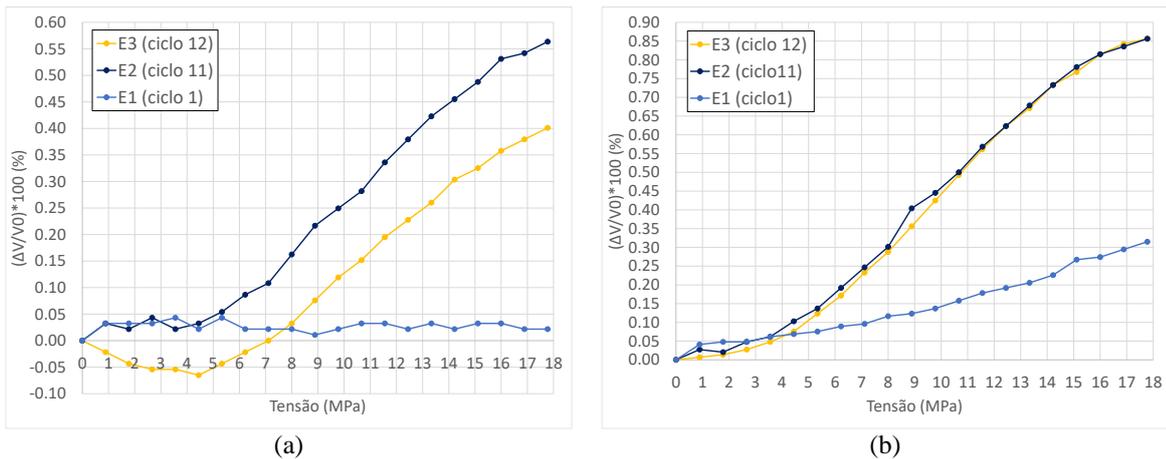
As figuras 5.33 e 5.34 apresentam os gráficos da variação relativa da velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da tensão no prisma C2P1 durante a fase de carregamento. O sinal de referência (V_0) utilizado na elaboração do gráfico de um ensaio foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão logo antes da fase de carregamento deste ensaio.

Figura 5.33- Variação relativa de velocidade em função da tensão para as ondas emitidas no prisma nos ciclos 1, 11 e 12: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



Fonte: Autor.

Figura 5.34- Variação relativa de velocidade em função da tensão para as ondas emitidas no prisma nos ciclos 1, 11 e 12: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.



Fonte: Autor.

Observou-se que o comportamento encontrado entre as curvas do primeiro ciclo (E1) e dos demais no prisma C4P1 (figuras 5.1 e 5.2) se repete para este prisma em estudo (figuras 5.33 e 5.34). Ou seja, as curvas do primeiro ciclo apresentaram efeito acustoelástico bem menor do que as curvas dos ciclos seguintes, comportamento que foi atribuído à diferentes valores de danificação entre os ensaios. Além disto, a curva referente ao primeiro ciclo das ondas OC₁₂ seguiu a mesma tendência de variação da velocidade com o acréscimo de tensão observada para a curva do primeiro ciclo das OC₁₂ no prisma C4P1. Ocorreu ganho de velocidade até um determinado valor de tensão, neste caso, 5.3 MPa. Após, a velocidade se manteve praticamente constante até 11.6 MPa e a partir deste valor houve decréscimo da velocidade com o aumento de tensão até o final do ensaio (figura 5.33b). Neste prisma, C2P1, as ondas OL₂₂ não apresentaram mudança na velocidade em função da tensão durante o carregamento do primeiro

ciclo (figura 5.34a). O comportamento observado nos gráficos do primeiro ciclo das ondas OC_{12} e OL_{22} mostraram que o efeito do dano foi bem maior para estes tipos de ondas.

Os resultados reforçaram a conclusão encontrada no estudo anterior, com o prisma C4P1, de que o primeiro ciclo de carregamento não é o adequado para a realização das análises sobre o comportamento acustoelástico do concreto.

Discussão 2: Estabilização da curva acustoelástica

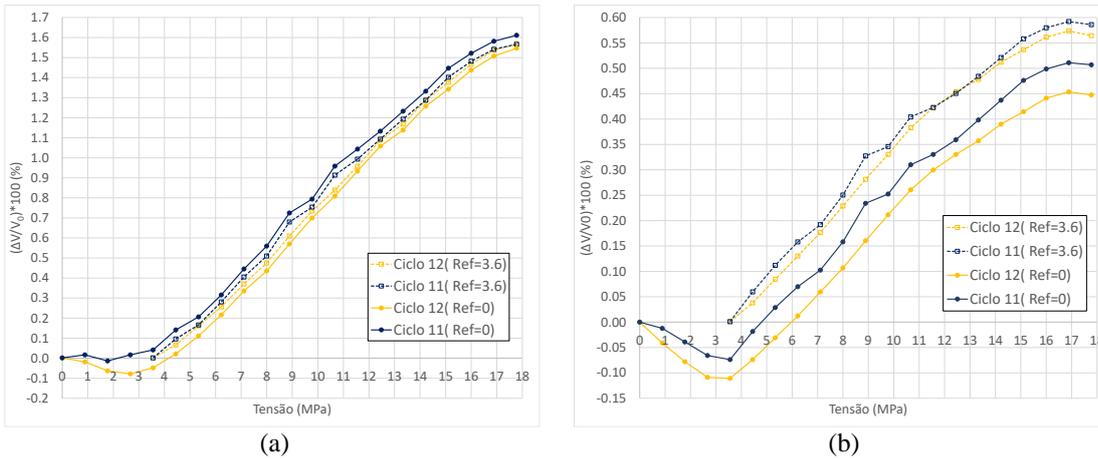
Com base no estudo da estabilização da curva acustoelástica realizado no prisma C4P1, após a realização do primeiro ensaio no prisma C2P1 (E1, ciclo 1), foram aplicados mais 9 ciclos de carregamento a fim de totalizar 10 ciclos e, assim, garantir a estabilização das curvas acustoelásticas ao realizar os ensaios ultrassônicos. Então, o ensaio para a obtenção da curva acustoelástica foi realizado no ciclo 11. Outro ensaio foi realizado na sequência, no ciclo 12, para verificar a estabilização.

A estabilização ficou bastante clara no caso das ondas OC_{21} , que apresentaram as curvas dos ciclos 11 e 12 com a mesma inclinação e praticamente sobrepostas (figura 5.34b). As curvas com mesma inclinação indicaram que as ondas tiveram a mesma taxa de ganho de velocidade em ambos os ciclos. A estabilização também foi evidente para as ondas OL_{11} e OC_{12} , cujas curvas dos ciclos 11 e 12, apesar de não estarem sobrepostas, estão próximas e possuem a mesma inclinação (figura 5.33). No caso das ondas OL_{22} (figura 5.34a), embora as curvas dos ciclos 11 e 12 estejam bastante afastadas em comparação ao que foi observado para os outros tipos de onda, verificou-se que elas também apresentaram taxas de ganho de velocidade em função da tensão muito semelhantes. Ou seja, as curvas dos ciclos 11 e 12 para as OL_{22} também estão estabilizadas. Diferentemente do que aconteceu com as curvas acustoelásticas das ondas referentes ao prisma C4P1, o trecho não linear que existe no início das curvas das ondas OL_{22} não foram semelhantes, mesmo após a estabilização. Esta diferença no traçado inicial das curvas estabilizadas gerou um deslocamento considerável entre elas. No entanto, observou-se nestas curvas que, a partir do momento que as velocidades começaram a aumentar com o acréscimo de tensão, este aumento ocorreu com a mesma taxa para ambas as curvas, o que fez com que elas se tornassem paralelas. O aumento de velocidade passou a ocorrer a partir da aplicação de 3.6 MPa e 4.4 MPa nos ciclos 11 e 12, respectivamente (figura 5.34a).

O gráfico de um determinado ensaio, nas figuras 5.33 e 5.34, foi gerado usando o CWI e teve como referência o sinal das ondas emitidas no prisma sem tensão aplicada (0 MPa) antes do início da fase de carregamento deste ensaio, assim como foi feito para obter as curvas das

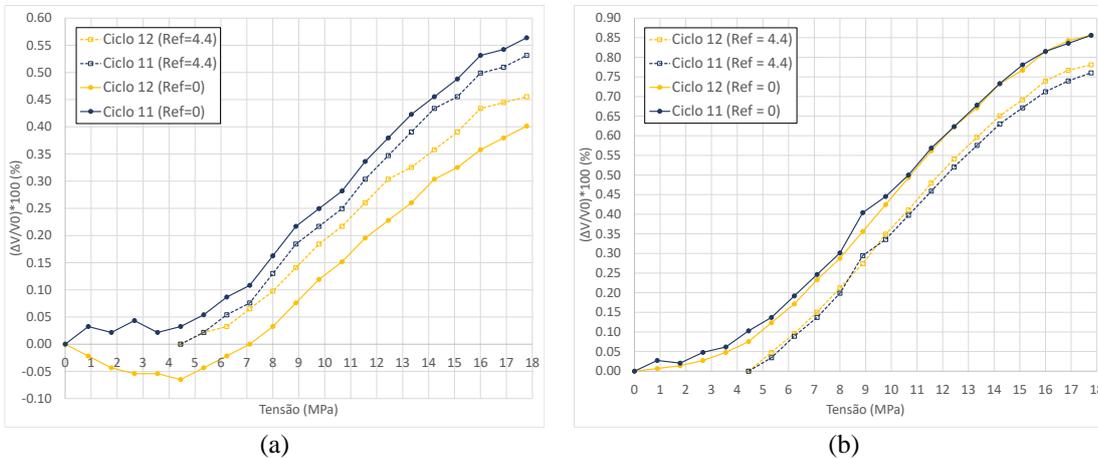
figuras 5.1 e 5.2 apresentadas no estudo do prisma C4P1. As figuras 5.35 e 5.36 também mostram os gráficos da variação relativa de velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da tensão, mas, usando diferentes sinais ultrassônicos como referência (V_0) para a elaboração destas curvas.

Figura 5.35- Variação relativa de velocidade em função da tensão usando os sinais para 0 MPa e 3.6 MPa como referência: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



Fonte: Autor.

Figura 5.36- Variação relativa de velocidade em função da tensão usando os sinais para 0 MPa e 4.4 MPa como referência: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.



Fonte: Autor.

Nas figuras 5.35a e 5.35b, são apresentadas as curvas dos ensaios 2 (ciclo 11) e 3 (ciclo 12) para as ondas OL₁₁ e OC₁₂ usando como referência o sinal emitido no prisma sem tensão antes da fase de carregamento dos ciclos 11 e 12, respectivamente (são as mesmas curvas das figuras 5.33a e 5.33b). São as curvas com linhas contínuas nas figuras 5.35a e 5.35b. Observou-se nestas curvas, que a partir da aplicação de 3.6 MPa, a variação de velocidade passou a aumentar com a tensão e que este aumento foi praticamente linear. Adotando o sinal das ondas emitidas no prisma durante o carregamento de 3.6 MPa como referência (V_0), foram geradas

novas curvas nas figuras 5.35a e 5.35b para os ciclos 11 e 12 (são as curvas com linhas tracejadas). O mesmo procedimento foi feito para a elaboração das curvas das ondas OL_{22} e OC_{21} nas figuras 5.36a e 5.36b. Foram geradas curvas para os ciclos 11 e 12 usando como referência o sinal das ondas propagadas no prisma sem tensão antes do carregamento dos ciclos 11 e 12, respectivamente (são as mesmas curvas das figuras 5.34a e 5.34b). São as curvas com linhas contínuas nas figuras 5.36a e 5.36b. Então, observou-se nestas curvas que, a partir do carregamento de 4.4 MPa, as velocidades das ondas OL_{22} e OC_{21} passaram a aumentar linearmente com o acréscimo de tensão. Por isto, foram geradas novas curvas para os ciclos 11 e 12 usando como referência (V_0) o sinal das ondas emitidas no prisma durante o carregamento de 4.4 MPa (são as curvas com linhas tracejadas).

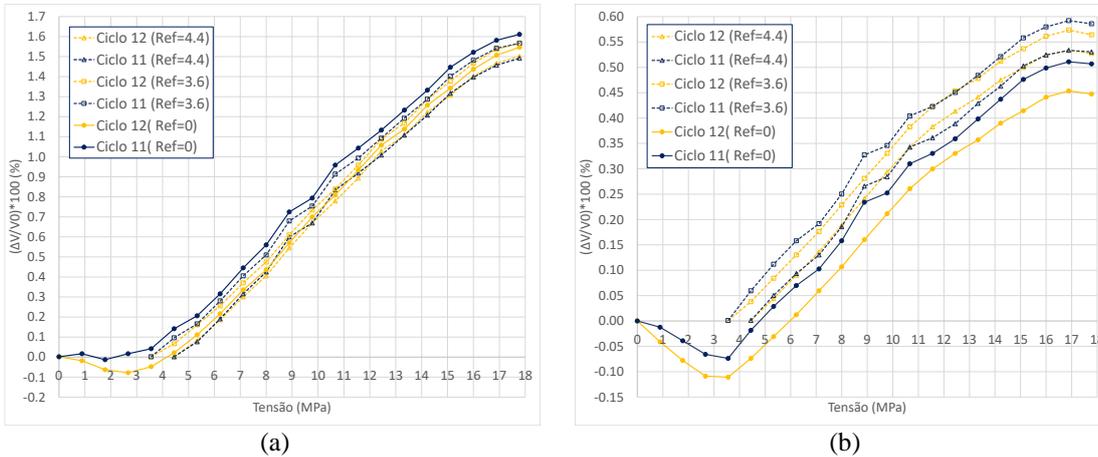
Observou-se que não existe mais o trecho não linear no início das curvas geradas utilizando como referência (V_0) os sinais das ondas emitidas no prisma com 3.6 MPa e 4.4 MPa (figuras 5.35 e 5.36). As curvas das ondas OL_{11} e OC_{12} , que estavam um pouco afastadas, se tornaram praticamente sobrepostas e continuaram paralelas, ou seja, com a mesma inclinação. O fato de elas continuarem paralelas apenas confirmou que o efeito acustoelástico está estabilizado para ambas as curvas e a aproximação ocorreu porque não existe mais o trecho não linear inicial. Nas curvas dos ciclos 11 e 12 das ondas OL_{11} elaboradas com referência no sinal para 0 MPa (figura 5.35a), embora a diferença entre os trechos não lineares não seja tão grande como a que ocorre no caso das ondas OL_{22} (figura 5.36a), ela existe e foi suficiente para gerar um certo afastamento das curvas. Ao eliminar este trecho, as curvas dos ciclos 11 e 12 se aproximaram. O mesmo foi observado em relação às ondas OC_{12} (figura 5.35b). No caso das ondas OC_{21} , as curvas já eram praticamente sobrepostas quando o sinal de referência era para 0 MPa (figura 5.36b), pois, o trecho não linear de ambas as curvas eram muito semelhantes. Portanto, com a mudança no sinal de referência, elas se mantiveram assim. As curvas referentes às ondas OL_{22} se aproximaram com a mudança no sinal de referência (figura 5.36a).

As inclinações das curvas acustoelásticas dos ciclos 11 e 12 com referência no sinal para 0 MPa continuaram as mesmas após mudar o sinal de referência. Independente de qual fosse o sinal usado como referência para gerar estas curvas, a inclinação, que representa a taxa de ganho de velocidade, seria sempre a mesma. As figuras 5.37 e 5.38 exemplificam isto. Nelas, estão apresentadas as curvas acustoelásticas geradas com diferentes sinais de referência: 0 MPa, 3.6 MPa e 4.4 MPa para as ondas OL_{11} e OC_{12} , e 0 MPa, 4.4 MPa e 7.1 MPa para as ondas OL_{22} e OC_{21} . Observou-se que a inclinação foi mantida.

Portanto, ficou evidente que, as curvas dos ciclos 11 e 12 estão estabilizadas em relação ao efeito acustoelástico para todos os tipos de ondas estudadas, mesmo quando estas curvas

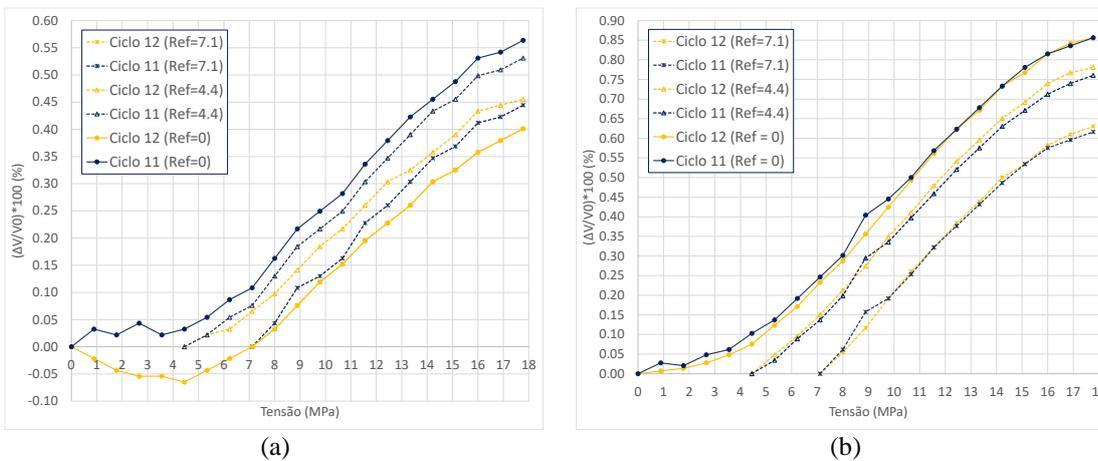
estão bastante afastadas. Além disto, verificou-se que a causa deste afastamento é a presença de traçados diferentes no trecho não linear no início destas curvas.

Figura 5.37- Variação relativa de velocidade em função da tensão usando os sinais para 0 MPa, 3.6 MPa e 4.4 MPa como referência: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



Fonte: Autor.

Figura 5.38- Variação relativa de velocidade em função da tensão usando os sinais para 0MPa, 4.4 MPa e 7.1 MPa como referência: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.

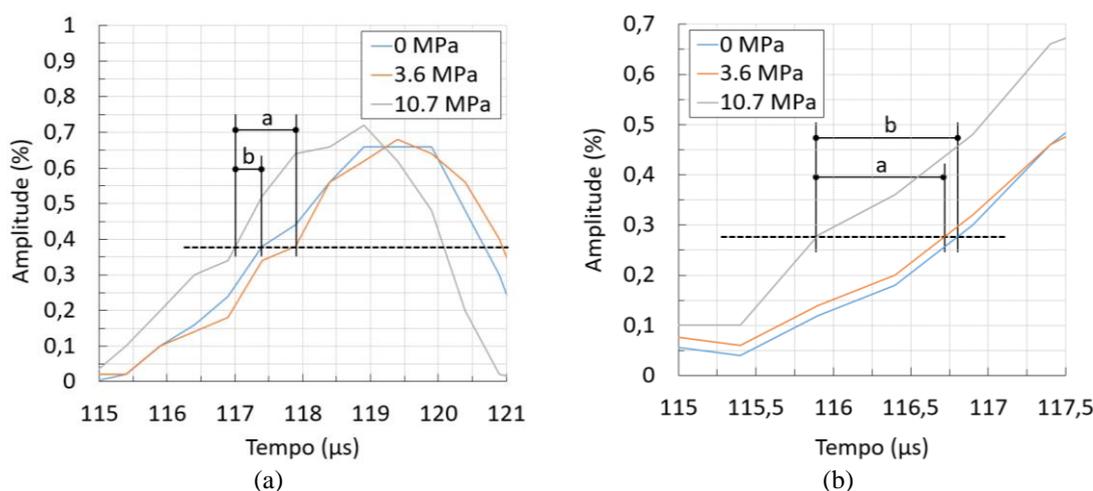


Fonte: Autor.

A variação relativa de velocidade para um certo valor de tensão obtida a partir da curva do ciclo 12 da onda OL₁₁ com o sinal de referência de 3.6 MPa foi maior do que a obtida para a curva do mesmo ciclo tendo como referência o sinal de 0 MPa (figura 5.35a). Observou-se neste último caso que, quando a tensão aplicada foi de 3.6 MPa, a variação relativa de velocidade foi negativa. Isto significa que o sinal ultrassônico para 3.6 MPa esteve à direita no eixo do tempo do sinal obtido para 0 MPa, o que ocorreu por conta da presença da não linearidade. Por conta disto, o sinal obtido para um certo carregamento, por exemplo, 10.7 MPa, estava mais afastado no eixo do tempo do sinal para 3.6 MPa do que do sinal para 0 MPa. O

mesmo ocorre para outros valores de carga diferentes de 10.7 MPa. Consequentemente, a variação relativa da velocidade foi maior quando a referência foi o sinal de 3.6 MPa. A figura 5.39a ilustra este exemplo. Nela, os sinais das ondas ultrassônicas OL₁₁ no ciclo 12 estão apresentados para os 3 níveis de tensão: 0MPa, 3.6 MPa e 10.7 MPa. Observou-se que a defasagem “a”, entre os sinais de 10.7 MPa e 3.6 MPa foi maior do que a defasagem “b”, entre 10.7 MPa e 0 MPa. No entanto, ocorreu o oposto no ciclo 11. Na curva da OL₁₁ para este ciclo (figura 5.35a), obtida com o sinal de referência no prisma livre de tensões, notou-se que a variação relativa de velocidade foi positiva quando a tensão aplicada foi de 3.6 MPa. Ou seja, o sinal referente à 3.6 MPa esteve à esquerda no eixo do tempo em relação ao sinal referente à 0 MPa. Então, neste caso, o sinal para 10.7 MPa está mais próximo no eixo do tempo do sinal para 3.6 MPa do que do sinal para 0 MPa. O resultado foi a obtenção de menor variação relativa de velocidade quando a referência foi o sinal de 3.6 MPa. A figura 5.39b ilustra este caso. A defasagem “a”, entre 10.7 e MPa e 3.6 MPa foi menor do que a “b”, entre 10.7 MPa e 0 MPa. Esta mesma discussão explica as diferenças entre os valores de variação relativa de velocidade para um mesmo valor de tensão obtidos quando foram adotados diferentes sinais de referência para gerar as curvas das ondas OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁ (figuras 5.35b, 5.36a e 5.36b, respectivamente).

Figura 5.39- Sinais ultrassônicos obtidos do prisma sem tensão (0 MPa), com 3.6 MPa e 10.7 MPa para as ondas OL₁₁: (a) no ciclo 12 e (b) no ciclo 11.



Fonte: Autor.

O presente estudo mostrou que, por causa da não linearidade inicial, as curvas estabilizadas nem sempre estarão sobrepostas ou bastante próximas. Pode ocorrer de elas estarem consideravelmente afastadas quando o traçado do trecho não linear for suficientemente diferente para causar este deslocamento entre elas. Deste modo, o estudo permitiu concluir que

a estabilidade das curvas acustoelásticas também é alcançada nestes casos. Além disto, o estudo atual comprovou o que foi observado no estudo anterior, com o prisma C4P1, de que a aplicação sequencial de 10 ciclos de carregamento no elemento de concreto é o suficiente para obter a estabilização das curvas acustoelásticas dos tipos de ondas analisados: OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁.

Afastamentos consideráveis entre as curvas estabilizadas para um certo tipo de onda, geram dificuldades em se estabelecer uma única curva que represente o comportamento acustoelástico do material para este tipo de onda. Pois, um mesmo valor de variação relativa de velocidade poderia estar relacionado com valores de tensão bem diferentes a depender deste afastamento. Adotando uma curva média para representar estas curvas, o erro encontrado no valor da tensão seria reduzido. No entanto, as incertezas ainda seriam grandes. Pois, fica a dúvida se a realização de ensaios na sequência destes gerariam novas curvas ainda mais afastadas. Como a causa deste afastamento são os diferentes traçados da parte não linear no início destas curvas, o estudo da causa da não linearidade inicial se mostra importante.

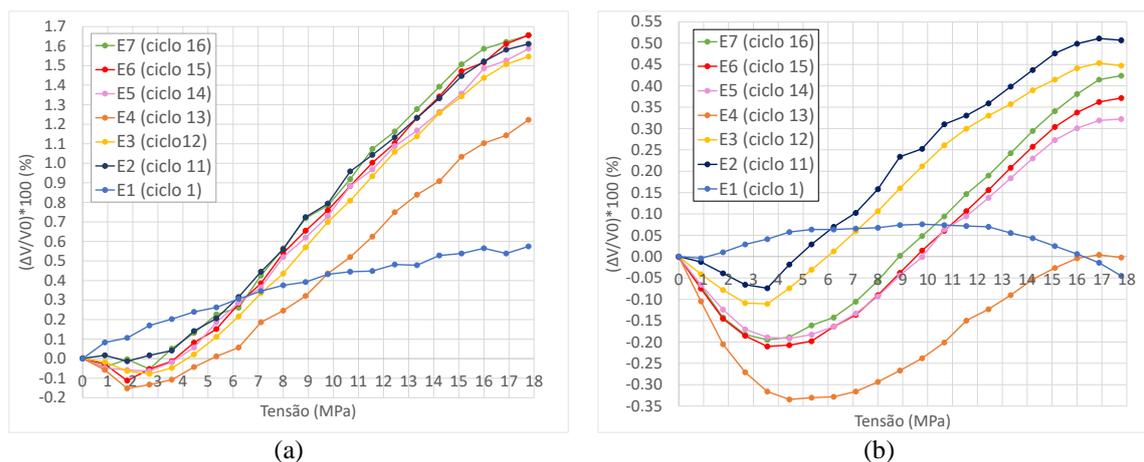
Se fosse possível realizar ensaios ultrassônicos em um corpo de prova retirado de um elemento *in situ* que se quer avaliar o nível de tensão, seria importante conseguir obter uma única curva que representasse o comportamento acustoelástico do concreto deste elemento a partir de curvas estabilizadas próximas entre si. Esta única curva poderia ser a curva média, que elaborada a partir das curvas estabilizadas próximas, acarretaria em pequenos erros na estimativa da tensão. Ou, esta única curva poderia ser a obtida durante o ciclo 11 de carregamento, que por estar estabilizada e próxima das demais curvas estabilizadas também acarretaria em pequenos erros na estimativa da tensão. Assim, esta curva poderia ser utilizada para encontrar as tensões correspondentes à valores de variação relativa de velocidade obtidos por meio da emissão de ondas ultrassônicas no elemento estrutural *in situ*.

Discussão 3: Curvas acustoelásticas de ensaios realizados semanas após a estabilização da curva.

Após 42 dias da realização dos 12 ciclos de carregamento no prisma C2P1, por meio dos quais obteve-se as curvas acustoelásticas estabilizadas, foram realizados mais 4 ensaios neste prisma. Eles foram efetuados na sequência e o objetivo foi verificar se as curvas manteriam a estabilização alcançada anteriormente já na aplicação do primeiro ensaio ou se existiria uma quantidade mínima de ciclos de carregamento que precisaria ser aplicada no concreto a fim de estabilizar novamente as curvas. As figuras 5.40 e 5.41 apresentam as curvas da variação relativa da velocidade das ondas em função da tensão dos ensaios 1, 2 e 3, realizados

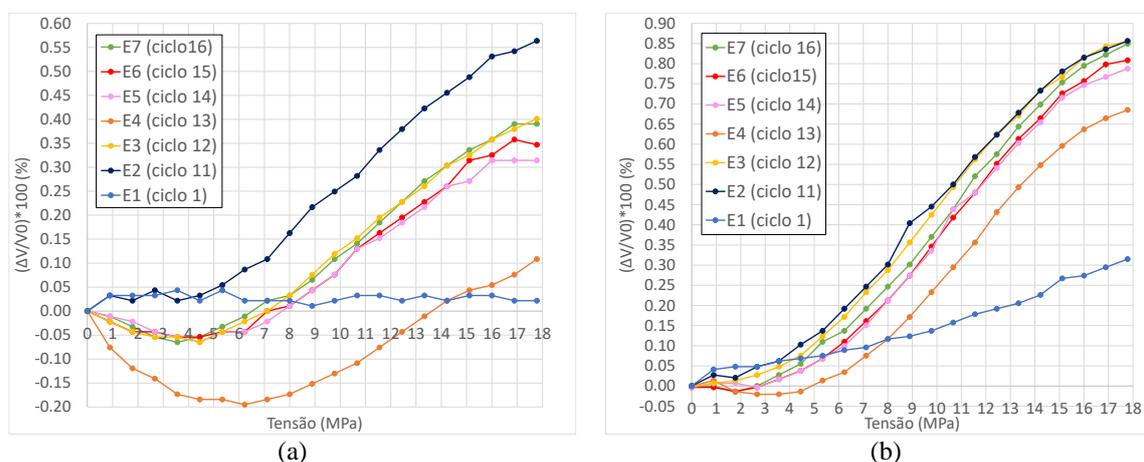
durante os ciclos 1, 11 e 12, respectivamente, e dos 4 ensaios realizados 42 dias após: ensaio 4 (ciclo 13), ensaio 5 (ciclo 14), ensaio 6 (ciclo 15) e ensaio 7 (ciclo 16). O sinal de referência utilizado no CWI para gerar a curva acustoelástica de um ensaio foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão imediatamente antes de iniciar a fase de carregamento deste ensaio.

Figura 5.40- Variação relativa de velocidade em função da tensão nos ensaios 1 ao 7 para as ondas: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



Fonte: Autor.

Figura 5.41- Variação relativa de velocidade em função da tensão nos ensaios 1 ao 7 para as ondas: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.



Fonte: Autor.

As curvas das ondas OL₁₁ referente aos novos 4 ensaios (figura 5.40a) apresentaram a mesma inclinação das curvas dos ciclos 11 e 12 (estabilizadas no primeiro dia de ensaios) a partir do ciclo 14, ou seja, a partir do segundo ensaio realizado após os 42 dias. Assim, foi necessário a aplicação de apenas 1 ciclo de carregamento para as curvas das ondas OL₁₁ se estabilizarem novamente. Além de apresentarem a mesma inclinação, as curvas dos ciclos 11,

12 e 14 ao 16 também estiveram bastante próximas. No caso das ondas OC_{12} , as curvas dos ciclos 13 ao 16 ficaram bastante afastadas das curvas dos ciclos 11 e 12 (figura 5.40b). No entanto, notou-se que a partir do ciclo 14 as inclinações das curvas foram praticamente iguais àquelas das curvas dos ciclos 11 e 12. Portanto, assim como para as ondas OL_{11} , a estabilização das ondas OC_{12} foi alcançada a partir do segundo ensaio realizado após os 42 dias. Observou-se que a não linearidade inicial das curvas referentes às ondas OC_{12} obtidas com os ciclos 14 ao 16 apresentou um comportamento bem diferente daquele encontrado nas curvas dos ciclos 11 e 12. No trecho não linear, ocorreu uma diminuição bem maior das velocidades das ondas para os ciclos 14 ao 16 em comparação com o que ocorreu nos ciclos 11 e 12 (figura 5.40b). O decréscimo de velocidade foi tão grande no início do ensaio dos ciclos 14 ao 16 que, mesmo no trecho linear, onde ocorre o ganho de velocidade com o acréscimo de tensão, a variação de velocidade das ondas ainda era negativa até a metade do carregamento (em torno de 10 MPa). Já nos ciclos 11 e 12, o decréscimo de velocidade no início do carregamento foi menor. Apesar das diferenças no trecho não linear, a parte linear das curvas dos ciclos 11, 12 e 14 ao 16 apresentaram mesma inclinação, uma vez que, quando se iniciou o ganho de velocidade isto aconteceu com a mesma taxa para estes ciclos. No caso das ondas OL_{22} (figura 5.41a) e das ondas OC_{21} (figura 5.41b), observou-se que a curva acustoelástica já estava estabilizada no primeiro ensaio realizado após os 42 dias, ensaio 4 (ciclo 13). Notou-se que, apesar de a curva do ciclo 13 estar mais afastada das demais, a inclinação foi a mesma. O afastamento foi causado novamente pelo trecho não linear inicial, que difere na curva do ciclo 13 em relação aos demais.

Para todos os tipos de ondas observou-se que, no primeiro ensaio realizado após os 42 dias, ensaio 4 (ciclo 13), a curva apresentou o trecho não linear inicial maior do que o encontrado nos ciclos anteriores e posteriores (figuras 5.40 e 5.41). No caso das ondas OC_{12} e OL_{22} , além de a não linearidade ter gerado grande diminuição nos valores das velocidades ela ocupou um trecho considerável do gráfico (figuras 5.40b e 5.41a). O ganho de velocidade com o acréscimo de tensão só começou a ocorrer a partir da aplicação de 6.2 MPa ($12.5\% f_{cm}$) para ambos os tipos de ondas. Apenas a partir deste valor de tensão o trecho se tornou linear. Além disto, como houve grande diminuição nos valores de velocidade, a variação relativa de velocidade permaneceu negativa durante quase todo o carregamento.

Por meio deste estudo verificou-se que, após estabilizar as curvas acustoelásticas, novos ensaios em dias posteriores ao da estabilização precisam ser realizados após a aplicação de pelo menos um ciclo de carregamento no elemento de concreto. Com isto, fica garantido que as curvas acustoelásticas obtidas para as ondas OL_{11} , OC_{12} , OL_{22} e OC_{21} estarão estabilizadas. Esta conclusão contribui para avançar no desenvolvimento de um procedimento confiável para

o estudo do comportamento acustoelástico no concreto. Por exemplo, quando se quer realizar ensaios acustoelásticos num mesmo elemento, mas em dias diferentes, será necessário que eles sejam realizados de modo a obter as curvas estabilizadas. Caso contrário, os resultados nos diferentes dias não poderão ser comparados. Para isto, após aplicar 10 ciclos de carregamento para a realização do ensaio no primeiro dia, será necessário aplicar pelo menos um ciclo de carregamento num outro dia, antes do ensaio definitivo para a obtenção da curva. Além disto, este estudo também contribui para o melhor entendimento do comportamento acustoelástico do concreto.

O afastamento que pode existir entre as curvas estabilizadas obtidas em diferentes dias de ensaios (figura 5.40b) remete à um cuidado que se deve ter em termos práticos. Existe a possibilidade, apesar de ainda não comprovada experimentalmente, de estimar a tensão no concreto de um elemento estrutural *in situ* por meio da correlação da velocidade das ondas emitidas através dele com o valor da tensão usando para tanto a curva acustoelástica estabilizada do concreto deste elemento. Uma maneira de obter esta curva, ainda não testada, poderia ser por meio do ensaio ultrassônico num corpo de prova extraído deste elemento estrutural. Por conta do grande afastamento que pode ocorrer entre as curvas estabilizadas de ensaios realizados em diferentes dias, seria importante que os ensaios nos corpos de prova fossem executados no mesmo dia da emissão das ondas no elemento estrutural. Assim, a velocidade obtida no concreto deste elemento seria relacionada com a curva acustoelástica deste material obtida no mesmo dia da emissão. Este procedimento poderia evitar grandes erros na estimativa da tensão caso as curvas de diferentes dias estivessem bastante deslocadas entre si. Cabe ressaltar mais uma vez a importância de estudar a causa da não linearidade inicial, já que a diferença no traçado delas entre curvas estabilizadas é que causa o afastamento destas. Como já foi discutido anteriormente, sem a não linearidade inicial as curvas estariam bastante próximas. Neste contexto, entre as ondas estudadas, as OL₁₁ e OC₂₁, se mostraram as mais adequadas para serem utilizadas na avaliação de tensões em estruturas de concreto *in situ*. Pois, as curvas estabilizadas destes tipos de ondas estiveram muito próximas, mesmo quando os ensaios foram realizados em dias diferentes. Por conta de as ondas OL₁₁ apresentarem maior variação de velocidade em função da tensão no material, em relação às OC₂₁, elas seriam ainda mais adequadas na análise de tensões.

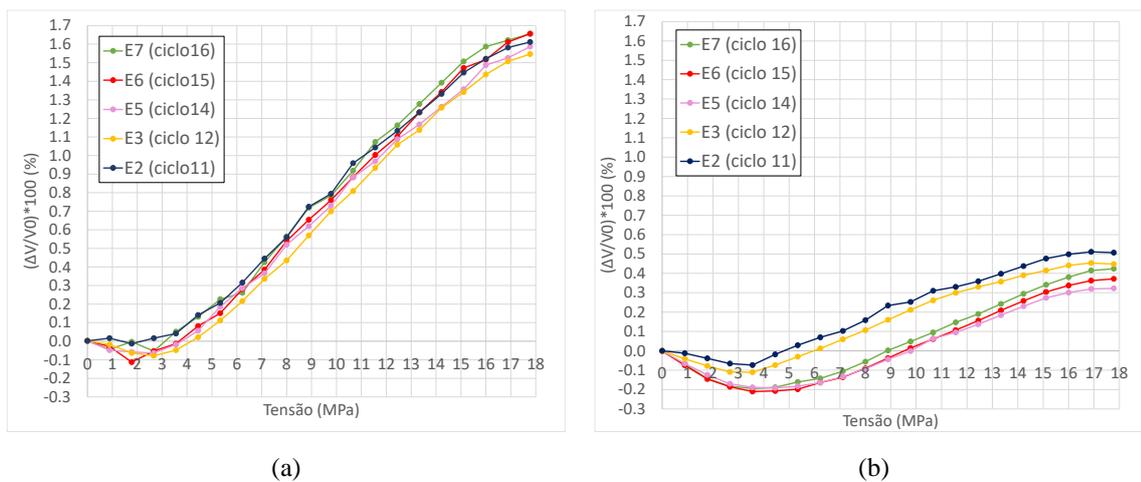
Discussão 4: Não linearidade inicial

Assim como no estudo do prisma C4P1, não foi observada a não linearidade no início das curvas acustoelásticas do primeiro ciclo de carregamento realizado nos prismas, ciclo 1 (ensaio 1 ou E1), como se verificou nas figuras 5.40 e 5.41. O trecho não linear apareceu em todas as curvas a partir do segundo ciclo no prisma, indicando que a causa da não linearidade estaria relacionada com a danificação que é gerada no primeiro ciclo de carregamento.

Discussão 5: Sensibilidade à tensão para os diferentes tipos de onda

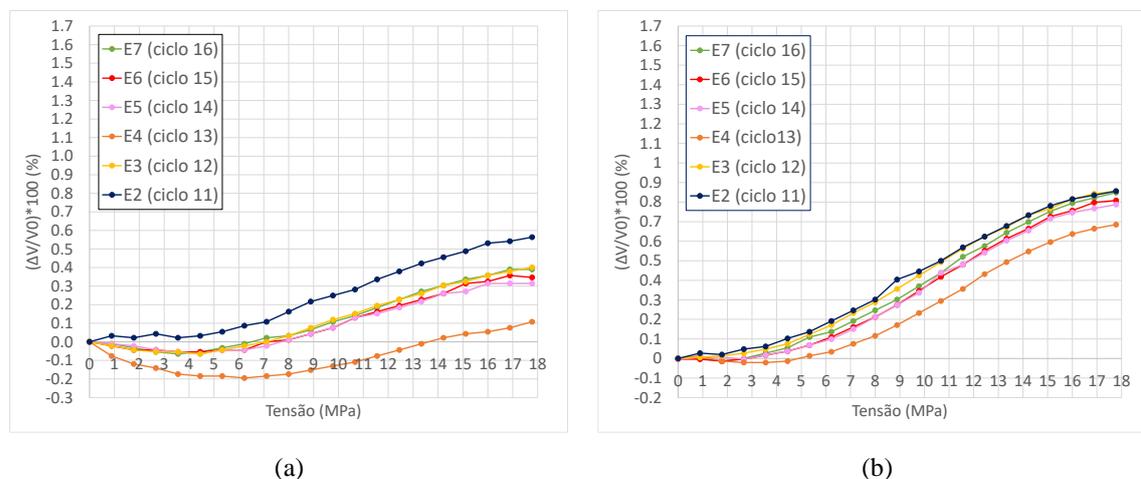
As curvas acustoelásticas estabilizadas para as ondas OL_{11} , OC_{12} , OL_{22} e OC_{21} utilizando a mesma escala no eixo vertical estão apresentadas nas figuras 5.42 e 5.43. Como observado para o prisma C4P1, as curvas referentes às ondas OL_{11} apresentaram a maior taxa de ganho de velocidade com a aplicação da tensão, conferindo às curvas destas ondas as maiores inclinações (figura 5.42a). Ou seja, as ondas OL_{11} foram as mais sensíveis às tensões. Em seguida, as ondas OC_{21} foram as mais sensíveis (figura 5.43b). Foram observadas inclinações muito próximas para as ondas OL_{22} e OC_{12} , indicando que estes tipos de onda foram igualmente sensíveis à tensão (figuras 5.43a e 5.42b). Este resultado também foi encontrado para o prisma C4P1.

Figura 5.42- Variação relativa de velocidade em função da tensão das curvas estabilizadas com os eixos na mesma escala para: (a) OL_{11} e (b) OC_{12}



Fonte: Autor.

Figura 5.43- Variação relativa de velocidade em função da tensão das curvas estabilizadas com os eixos na mesma escala para: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.



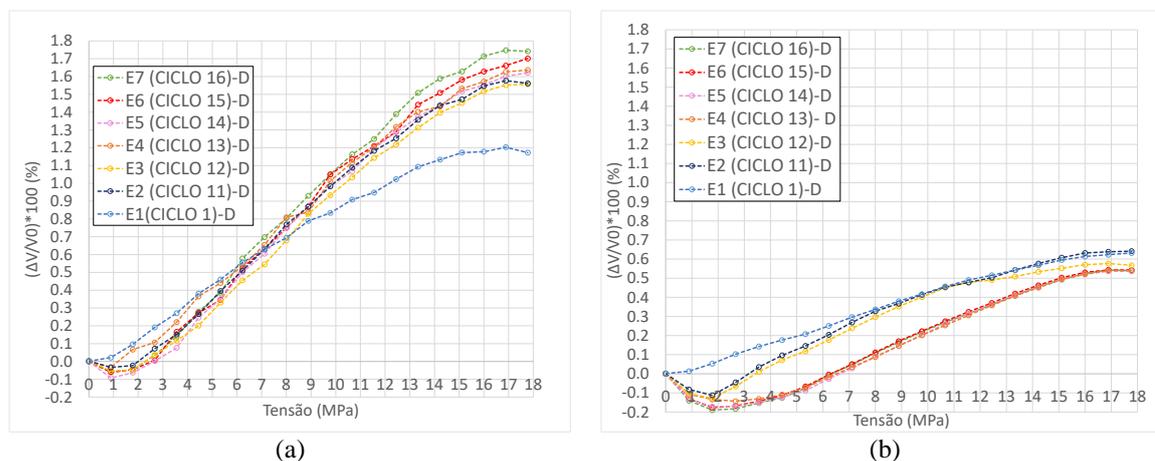
Fonte: Autor.

5.2.4 Prisma C2P1 – Análises para a fase de descarregamento

Discussão 1: Estabilização da curva acustoelástica

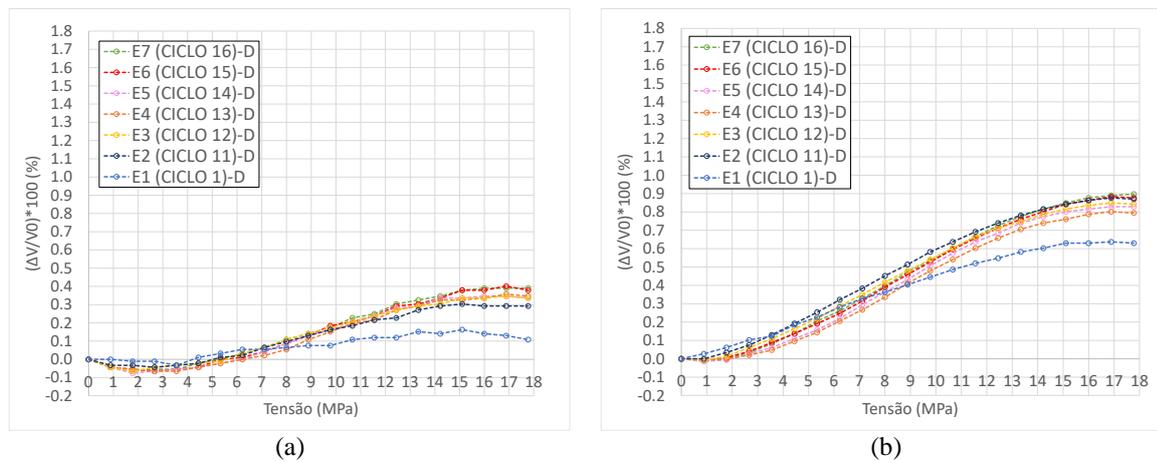
As curvas da variação relativa da velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da tensão (σ) para as fases de descarregamento do prisma C2P1 estão apresentadas na figura 5.44 para as ondas OL₁₁ e OC₁₂ e na figura 5.45 para as ondas OL₂₂ e OC₂₁. O sinal ultrassônico usado como referência (V_0) no CWI para a elaboração da curva de um determinado ensaio foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão logo após o descarregamento deste ensaio. As curvas nestas figuras são dos 3 ensaios realizados em um dia, E1 (ciclo 1), E2 (ciclo 11) e E3 (ciclo 12) e dos ensaios realizados 42 dias após, E4 (ciclo 13), E5 (ciclo 14), E6 (ciclo 15) e E7 (ciclo 16).

Figura 5.44- Variação relativa de velocidade em função da tensão na fase de descarregamento para: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



Fonte: Autor.

Figura 5.45- Variação relativa de velocidade em função da tensão na fase de descarregamento para: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.



Fonte: Autor.

Para os quatro tipos de ondas ultrassônicas, a curva de descarregamento do ciclo 12 (E3) apresentou a mesma inclinação da curva de descarregamento do ciclo 11 (E2) (figuras 5.44 e 5.45). Portanto, como já era esperado, estas curvas estão estabilizadas.

Sobre as curvas elaboradas para a fase de descarregamento dos ensaios realizados 42 dias após a aplicação dos primeiros 12 ciclos, observou-se que a estabilização ocorreu desde a curva do primeiro ensaio (E4, ciclo 13) para os quatro tipos de ondas (figuras 5.44 e 5.45). Portanto, quando se realiza a estabilização das curvas acustoelásticas das ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁ num elemento de concreto num determinado dia, para obter as curvas estabilizadas para a fase de descarregamento deste elemento num outro dia (após a estabilização), bastaria realizar o ensaio já no primeiro ciclo de descarregamento. Ou seja, não seria necessário aplicar algum ciclo antes da realização do ensaio para garantir a estabilização das curvas.

Então, quando ainda não foi realizada a estabilização das curvas acustoelásticas num elemento de concreto, é necessária a aplicação de 10 ciclos de carregamento e descarregamento neste elemento a fim de garantir a estabilização das curvas para ambas as fases, de carregamento e descarregamento, ao se realizar o ensaio no ciclo seguinte (ciclo 11). Para se realizar outros ensaios neste mesmo elemento, mas num dia diferente ao da estabilização, é necessário aplicar pelo menos 1 ciclo de carregamento e descarregamento e realizar o ensaio no ciclo seguinte para se obter a curva estabilizada para a fase de carregamento. No entanto, se o objetivo for obter apenas a curva estabilizada para a fase de descarregamento, basta realizar o ensaio para a obtenção da curva já no primeiro ciclo de descarregamento do elemento. Isto é, não é necessário aplicar algum ciclo antes da realização do ensaio.

Quanto menor for a quantidade de ciclos necessária para se alcançar a estabilização das curvas acustoelásticas, menor é o tempo gasto em laboratório para a realização dos ensaios.

Dependendo da quantidade de ciclos a ser realizada e da carga máxima de cada ciclo, a aplicação deles pode levar um longo tempo. Deste modo, as conclusões discutidas acima contribuem para a elaboração de um procedimento de ensaio otimizado, pois diminui o tempo em laboratório.

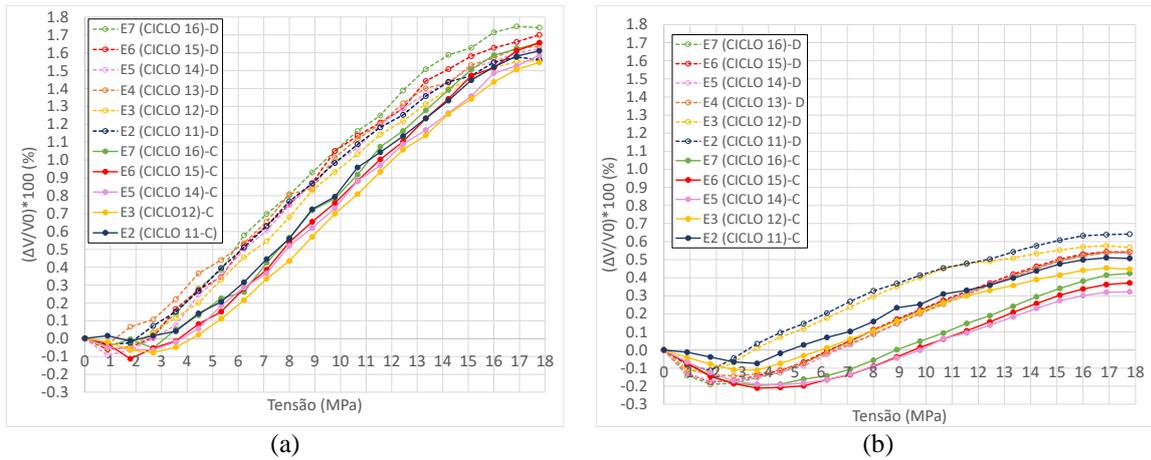
Para as ondas OL₂₂, observou-se que, apesar de as curvas estabilizadas dos ciclos 11 e 12 estarem afastadas na fase de carregamento (figura 5.43a), elas estiveram bastante próximas na fase de descarregamento (figura 5.45a). Isto ocorreu, pois, no descarregamento, o traçado do trecho não linear no início das curvas foi semelhante. Além disto, as curvas estabilizadas na fase de descarregamento para os dois diferentes dias (curvas dos ciclos 11 ao 16) estiveram bem próximas. Observou-se também para as ondas OL₁₁ e OC₂₁ que as curvas estabilizadas na fase de descarregamento dos dois diferentes dias (curvas dos ciclos 11 ao 16) se apresentaram bastante próximas, o que também se deve ao traçado semelhante do trecho não linear no início destas curvas (figuras 5.44a e 5.45b). No caso das ondas OC₁₂, as curvas estabilizadas dos dois diferentes dias apresentaram este traçado bem diferente, como pode ser visto ao comparar a não linearidade inicial das curvas dos ciclos 11 e 12 com a das curvas dos ciclos 13 ao 16 na figura 5.44b. Este mesmo comportamento foi observado nas curvas estabilizadas dos dois diferentes dias para a fase de carregamento (figura 5.42b).

Como as curvas estabilizadas para a fase de descarregamento dos dois dias (curvas dos ciclos 11 ao 16) estão bastante próximas para as ondas OL₁₁, OL₂₂ e OC₂₁, qualquer uma destas curvas poderia ser utilizada para representar o comportamento acustoelástico do concreto no descarregamento. A fim de se realizar a menor quantidade de ciclos, poderia ser utilizada a curva do ciclo 11 para representar este comportamento. Isto é interessante do ponto de vista prático, ou seja, para a avaliação de estruturas *in situ*, pois, mostra que seria necessário obter a curva acustoelástica apenas uma vez. Então, após obter esta curva para um elemento estrutural num dia, ela poderia ser utilizada para fazer a avaliação em outros dias, o que possibilitaria fazer um monitoramento do estado de tensões do elemento.

Discussão 2: Comparação entre as curvas acustoelásticas nas fases de carregamento e descarregamento

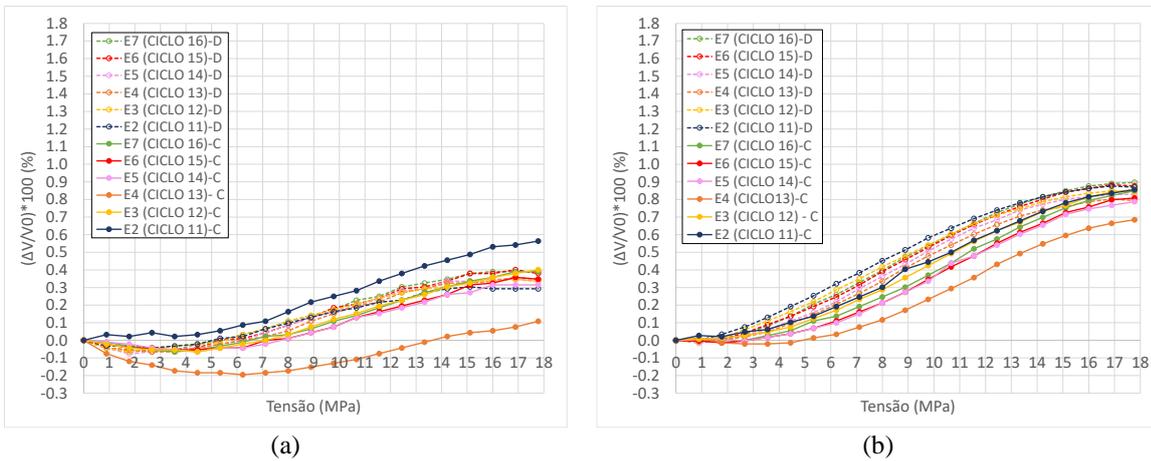
As curvas acustoelásticas estabilizadas referentes às fases de carregamento e descarregamento para as ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁ estão apresentadas nas figuras 5.46 e 5.47.

Figura 5.46- Curvas estabilizadas para as fases de carregamento e descarregamento: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



Fonte: Autor.

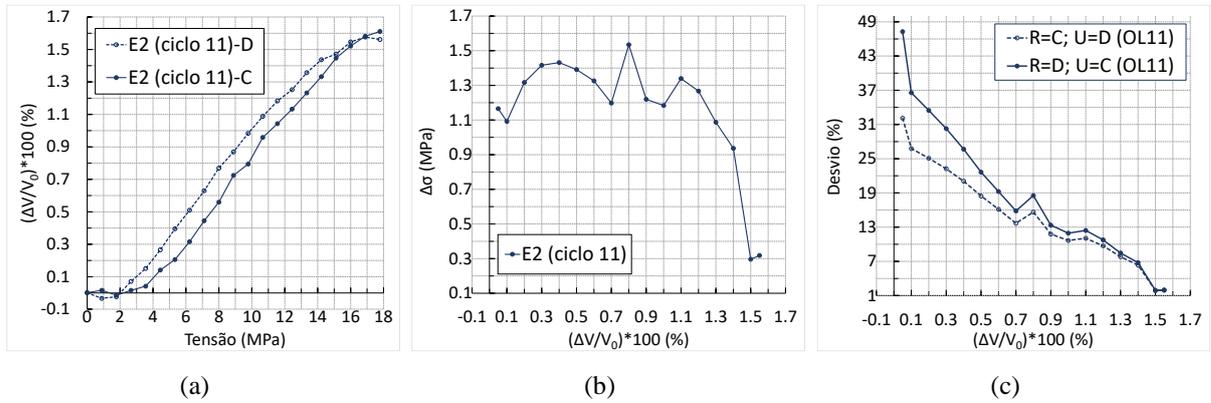
Figura 5.47- Curvas estabilizadas para as fases de carregamento e descarregamento: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.



Fonte: Autor.

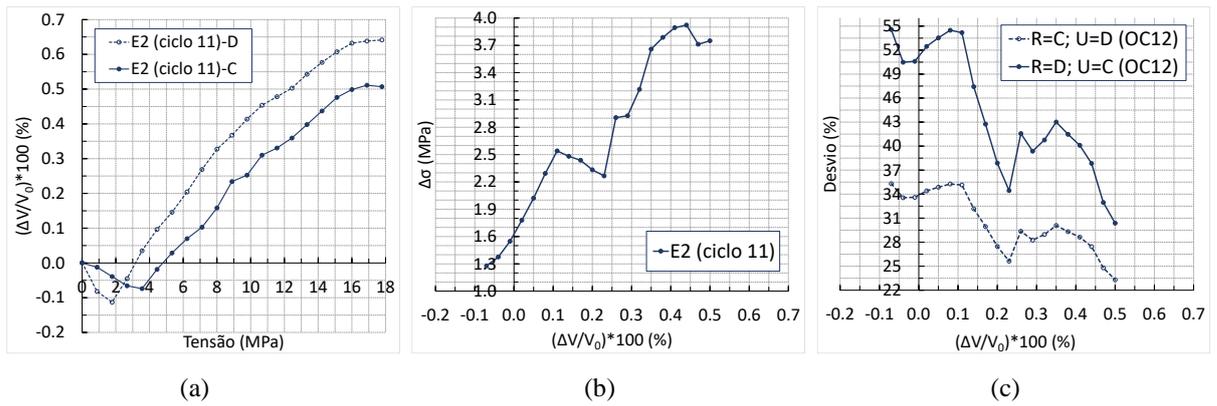
Assim como verificado para o prisma C4P1, a taxa de ganho de velocidade em função da tensão foi maior para a fase de descarregamento. Apenas no caso das ondas OL₂₂, ocorreu o inverso para o ciclo 11 (figura 5.47a). No entanto, nos ciclos seguintes, as curvas do descarregamento estiveram acima das de carregamento. As diferentes taxas de ganho de velocidade entre ambas as fases faz com que um mesmo valor de variação relativa de velocidade ($\Delta V/V_0$) esteja associado a diferentes valores de tensão em cada fase. O estudo da diferença entre os valores de tensões obtidos para um mesmo valor de variação relativa de velocidade por meio das curvas de carregamento e descarregamento foi feito com base nas figuras 5.48 à 5.51, assim como foi feito para o prisma C4P1.

Figura 5.48- Gráficos para as ondas OL₁₁: (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.



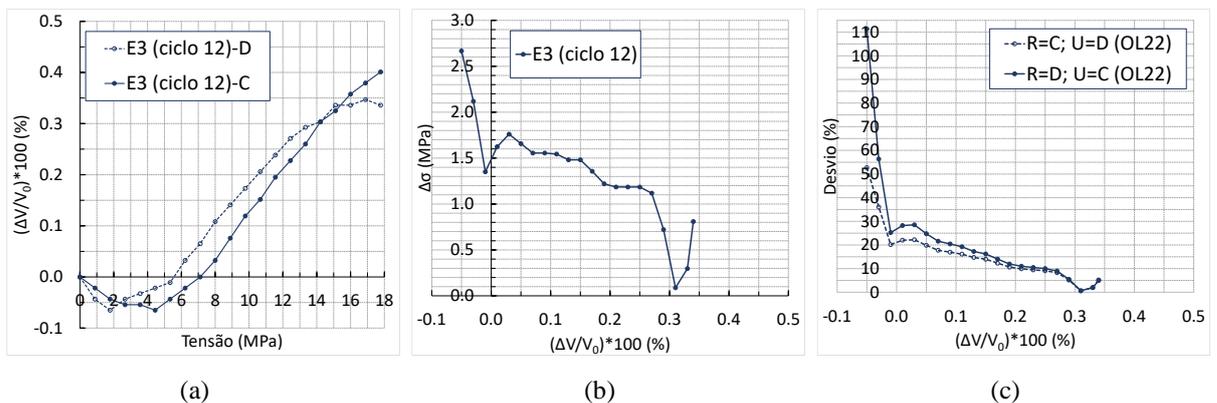
Fonte: Autor.

Figura 5.49- Gráficos para as ondas OC₁₂: (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.



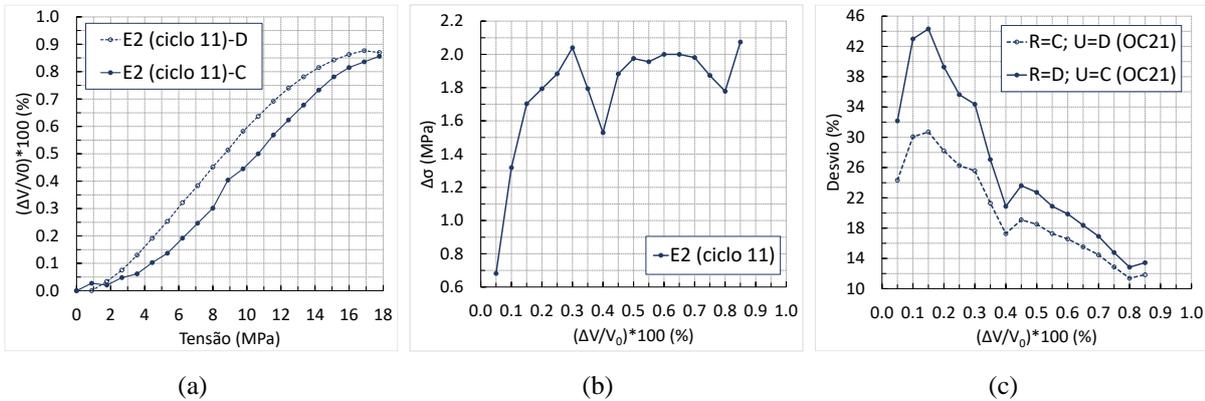
Fonte: Autor.

Figura 5.50- Gráficos para as ondas OL₂₂: (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 12 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.



Fonte: Autor.

Figura 5.51- Gráficos para as ondas OC₂₁: (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 11 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.



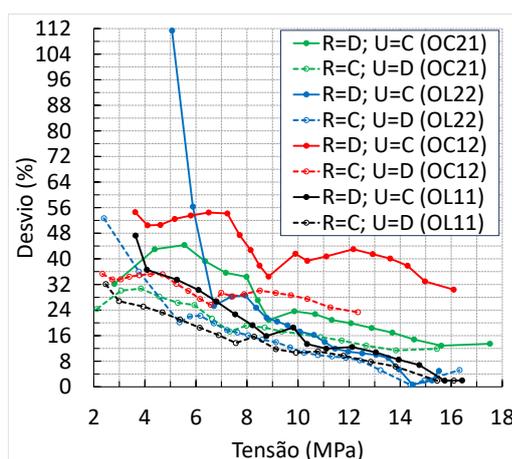
Fonte: Autor.

As figuras 5.48a, 5.49a e 5.51a mostram as curvas acustoelásticas estabilizadas para as fases de carregamento e descarregamento dos ciclos 11 para as ondas OL₁₁, OC₁₂ e OC₂₁, respectivamente, e a figura 5.50a mostra estas curvas referentes ao ciclo 12 para as ondas OL₂₂. Foi escolhido o ciclo 12 ao invés do 11 para este tipo de onda por causa de a curva da fase de descarregamento estar acima da curva da fase de carregamento no ciclo 12, que foi o comportamento encontrado para os outros tipos de ondas deste prisma em estudo e também para todos os tipos de ondas do prisma C4P1. A diferença entre os valores de tensão ($\Delta\sigma$) correspondentes à um mesmo valor de variação relativa de velocidade ($\Delta V/V_0$) obtida por meio das curvas de carregamento e descarregamento das figuras 5.48a à 5.51a estão apresentadas nas figuras 5.48b à 5.51b. As figuras 5.48c à 5.51c mostram o desvio, em porcentagem, de $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma. Como a tensão real pode ser a obtida pela curva de carregamento ou pela curva de descarregamento, o cálculo deste desvio foi feito para ambas as situações. Na primeira, considerou-se que o prisma estava carregado e na fase de carregamento, mas as velocidades das ondas emitidas através dele foram associadas à valores de tensão usando a curva acustoelástica obtida para a fase de descarregamento. Ou seja, a curva real (R) é a da fase de carregamento (C), no entanto, a curva utilizada (U) foi a da fase de descarregamento (D). O desvio calculado para esta situação está representado pela curva “R=C; U=D”. Na segunda situação, foi suposto o contrário, isto é, que o prisma estava carregado e na fase de descarregamento, mas, as velocidades das ondas emitidas através dele foram associadas à valores de tensão por meio da curva obtida para a fase de carregamento. Neste caso, a curva real (R) é a de descarregamento (D), mas, a utilizada (U) foi a de carregamento (C). Então, o desvio calculado para esta situação está representado pela curva “R=D; U=C”.

Assim como foi observado para o prisma C4P1, as figuras 5.48b à 5.51b mostraram que os desvios foram menores quando a curva referente à fase de descarregamento foi utilizada para se avaliar as tensões, mas a curva real era a da fase de carregamento. Portanto, este estudo reafirma que, quando se quer avaliar o nível de tensão num elemento de concreto *in situ* usando o ultrassom, mas, não se sabe se ele se encontra na fase de carregamento ou de descarregamento, os menores desvios nos valores da tensão seriam encontrados ao se utilizar a curva obtida para o concreto deste elemento para a fase de descarregamento.

Além disto, como no caso do prisma C4P1, também foi verificado que o desvio (%) diminuiu com o aumento do carregamento do prisma (figuras 5.48c à 5.51c), pois, quanto maiores foram os valores de $\Delta V/V_0$, menores foram os valores dos desvios (%). Para visualizar melhor esta observação, foi gerada a figura 5.52, que mostra o valor do desvio (%) ao usar a curva acustoelástica para a fase errada em função da tensão estimada no prisma. Como observado para o prisma C4P1, as tensões obtidas por meio das curvas acustoelásticas das ondas OL₁₁ foram as que proporcionaram menores desvios nos valores estimados das tensões e as curvas das ondas OC₁₂ foram as que acarretaram nos maiores desvios. Com isto, o estudo no presente prisma confirma que as ondas OL₁₁ seriam as mais favoráveis para serem empregadas na avaliação de tensões em elementos de concreto *in situ*.

Figura 5.52- Desvio, em porcentagem, em função da tensão estimada no prisma para as ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁.



Fonte: Autor.

5.2.5 Resumo do estudo dos ciclos na fase de carregamento para os dois prismas estudados

Em resumo, foi observado que a estabilização da curva acustelástica ocorre a partir do ciclo de carregamento em que a inclinação da curva acustoelástica passa a ser constante em

diferentes ensaios. Este fato faz com que as curvas estabilizadas passem a ficar sobrepostas ou bastante próximas como foi observado no caso do prisma C4P1. No entanto, o estudo feito com o prisma C2P1 mostrou que a não linearidade inicial que existe nas curvas estabilizadas pode não ser a mesma em diferentes ensaios. A diferença no traçado não linear inicial das curvas gerou um afastamento considerável entre as curvas estabilizadas das ondas OL₂₂. No entanto, a estabilização foi verificada, já que estas curvas passaram a apresentar praticamente a mesma taxa de ganho de velocidade a partir do momento em que as velocidades passaram a aumentar com a aplicação da tensão. Com isto, foram observadas duas possibilidades de comportamento das curvas a partir da estabilização. Na primeira, a não linearidade das curvas apresenta o mesmo comportamento e com isto as curvas ficam praticamente sobrepostas ou bastante próximas. Na segunda, a não linearidade inicial possui um comportamento diferente entre as curvas estabilizadas fazendo que elas fiquem afastadas. Em ambos os casos foi observado que, a partir do momento em que as curvas começam a apresentar aumento de velocidade com o acréscimo de tensão, a taxa de ganho de velocidade é a mesma fazendo com que as curvas se tornem paralelas. Observou-se que a aplicação sequencial de 10 ciclos de carregamento no concreto é o suficiente para garantir que as curvas acustoelásticas das ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁ estejam estabilizadas no ciclo seguinte (ciclo 11).

Por meio deste estudo, também foi verificado que, se houver a necessidade de realizar novos ensaios em um elemento de concreto em um dia diferente daquele em que foi feita a estabilização das curvas, é necessário aplicar pelo menos um ciclo de carregamento antes da realização do ensaio. Deste modo, garante-se que as curvas obtidas no ensaio estarão estabilizadas.

As curvas dos quatro tipos de ondas não apresentaram a não linearidade inicial quando o prisma foi ensaiado pela primeira vez (ensaio 1, ciclo 1). Mas, passaram a apresentar a não linearidade no trecho inicial a partir do segundo ensaio (ensaio 2, ciclo 2) realizado no elemento, o que relaciona a não linearidade com o efeito dos danos gerados no primeiro ensaio, quando o carregamento foi aplicado no material pela primeira vez.

5.2.6 Resumo do estudo dos ciclos na fase de descarregamento para os dois prismas estudados

O estudo no prisma C4P1 mostrou que a estabilização das curvas acustoelásticas das ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁ na fase de descarregamento ocorreram após a aplicação do mesmo número de ciclos necessário para estabilizar as curvas para a fase de carregamento. Ou seja, após 4 ciclos para as OL₁₁ e OC₁₂, 7 ciclos para as OL₂₂ e 9 ciclos para as OC₂₁. Sendo

assim, a aplicação sequencial de 10 ciclos de carregamento e descarregamento no elemento de concreto foi o suficiente para garantir a estabilização das curvas dos quatro tipos de ondas para ambas as fases ao se realizar o ensaio no ciclo seguinte, ciclo 11. No prisma C2P1, verificou-se que as curvas acustoelásticas para a fase de descarregamento estavam estabilizadas após a aplicação sequencial de 10 ciclos de carregamento e descarregamento. Sendo assim, ficou comprovado que a aplicação na sequência de 10 ciclos de carregamento e descarregamento estabiliza as curvas acustoleásticas destas ondas.

Os ensaios realizados em diferentes dias no prisma C2P1 permitiram verificar que, após realizar a estabilização das curvas acustoelásticas em um dia, as curvas para a fase de descarregamento já estarão estabilizadas no primeiro ciclo de descarregamento do ensaio realizado num outro dia após o dia da estabilização. Ou seja, se o objetivo for obter a curva acustoelástica de descarregamento num certo dia após o dia da estabilização, não será necessário aplicar pré-ciclos de carregamento e descarregamento no elemento a fim de estabilizar as curvas acustoelásticas antes da realização do ensaio.

O estudo do comportamento acustoelástico do concreto na fase de descarregamento nos prismas C4P1 e C2P1 permitiu verificar que as curvas referentes à esta fase apresentam maior taxa de ganho de velocidade em função da tensão de compressão em comparação com as curvas da fase de carregamento. Ou seja, um mesmo valor de variação relativa de velocidade ($\Delta V/V_0$) forneceria diferentes valores de tensão dependendo da curva utilizada, de carregamento ou descarregamento. Para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$, valores menores de tensão seriam obtidos ao se utilizar a curva de descarregamento. Desta maneira, ao se avaliar um elemento de concreto carregado, mas sem conhecimento da fase (carregamento ou descarregamento) em que ele se encontra, poderia ser obtido um valor de tensão que apresentaria um desvio em relação ao valor real. Isto poderia ocorrer quando o elemento se encontrasse na fase de carregamento, mas a curva utilizada para relacionar os valores de velocidade das ondas emitidas através dele com as tensões fosse a curva da fase de descarregamento, ou vice-versa. Neste trabalho, verificou-se que, quando não se sabe em que fase o elemento a ser avaliado se encontra, o melhor seria utilizar a curva de descarregamento para se fazer a correlação das velocidades com os níveis de tensão. Esta seria a melhor alternativa, pois, verificou-se que o desvio (%), na obtenção da tensão, será menor quando a curva utilizada for a da fase de descarregamento sendo que o elemento está na fase de carregamento do que o contrário. Além disto, observou-se que quanto maior for o nível de tensão atuante no elemento de concreto, menor será este desvio (%), obtido no valor real da tensão. Este estudo também mostrou que as curvas acustoelásticas das ondas OL₁₁ são as que resultam em menores desvios (%) nos valores reais das tensões ao utilizar a

curva acusoelástica para a fase errada. Neste contexto, elas seriam o tipo de onda mais adequada na avaliação de tensões por meio do ultrassom.

Foi visto que as curvas acustoelásticas para a fase de descarregamento apresentaram maior efeito acustolástico do que as curvas para a fase de carregamento e também forneceriam menores desvios ao serem utilizadas na avaliação das tensões quando não se sabe em que fase se encontra o elemento que se quer avaliar. Neste contexto, as curvas para a fase de descarregamento seriam as mais adequadas para serem utilizadas na avaliação de tensões com o uso do ultrassom.

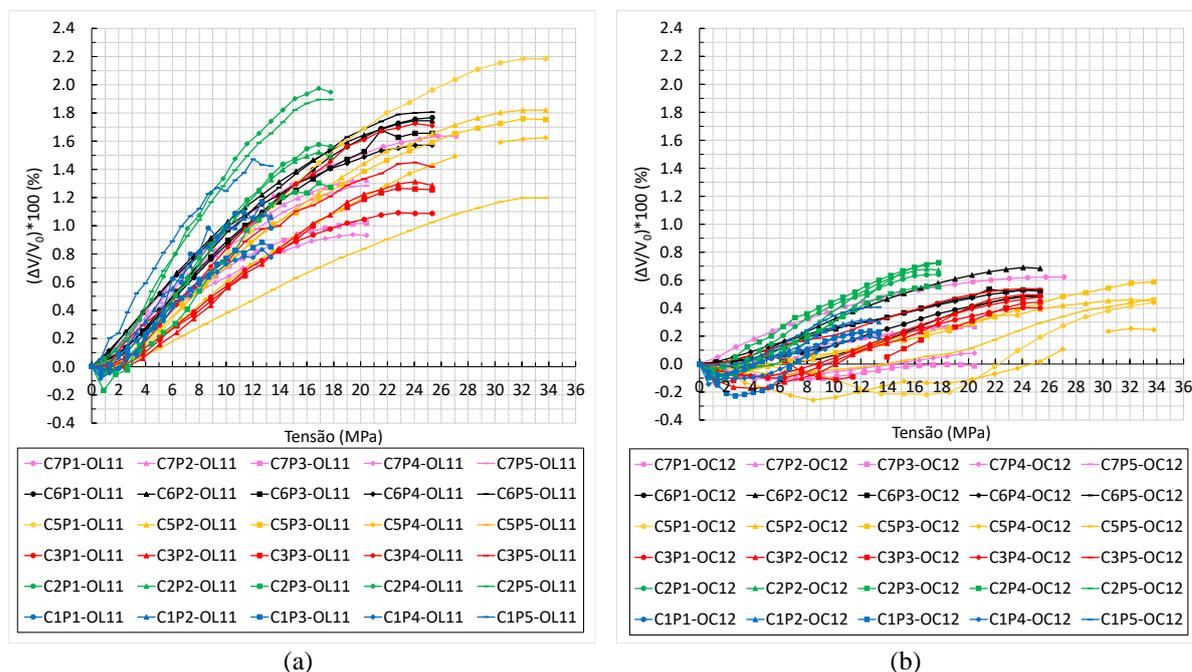
5.3 Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços pelo método de transmissão direta

O efeito acustoleástico em prismas de diferentes traços foi estudado. Foi analisada a influência das propriedades do concreto neste efeito e propostas equações empíricas a fim de se obter o valor da tensão aplicada num elemento de concreto por meio do conhecimento destas propriedades. Neste estudo, as curvas acustoelásticas foram geradas para a fase de descarregamento dos prismas.

5.3.1 Efeito acustoelástico em prismas de diferentes traços de concreto

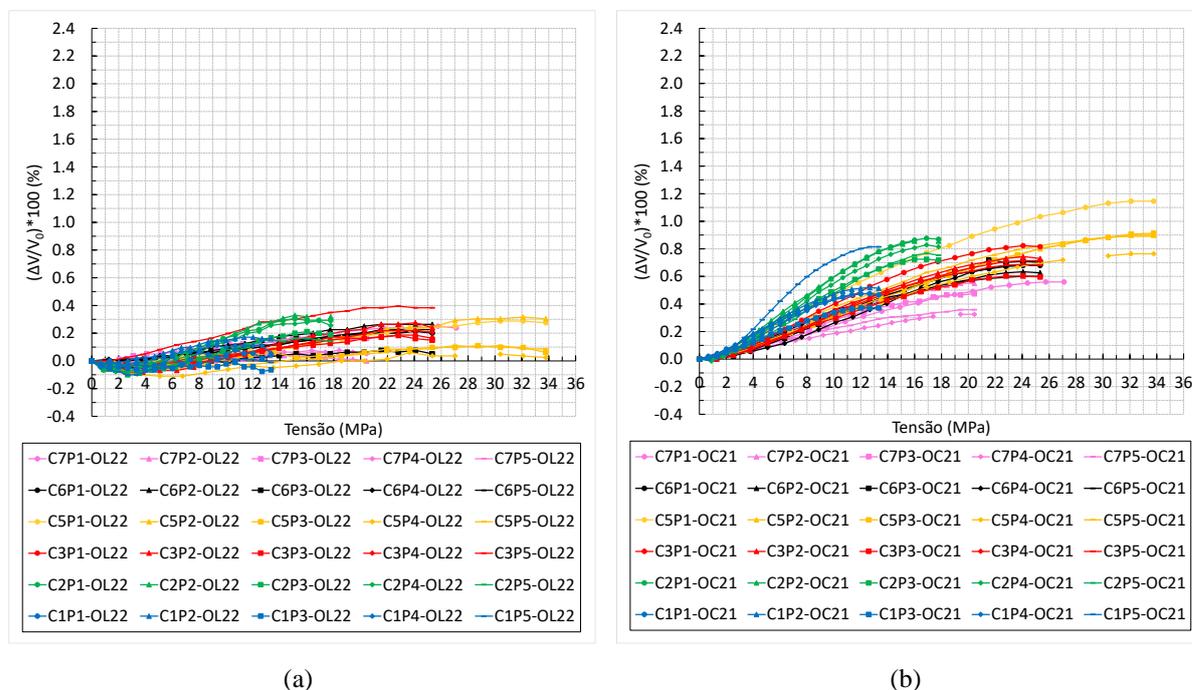
As curvas da variação relativa de velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da tensão para os 5 prismas de cada traço foram feitas para a fase de descarregamento dos ensaios. O sinal utilizado como referência para a realização da curva de um ensaio foi o da emissão das ondas no prisma sem tensão logo após o final da fase de descarregamento deste ensaio. As curvas de $\Delta V/V_0$ em função da tensão aplicada (σ) estão apresentadas nas figuras 5.53 e 5.54 para as ondas OL₁₁, OC₁₂, OL₂₂ e OC₂₁.

Figura 5.53– Variação relativa da velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da tensão aplicada (σ) nas fase de descarregamento para as ondas: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



Fonte: Autor.

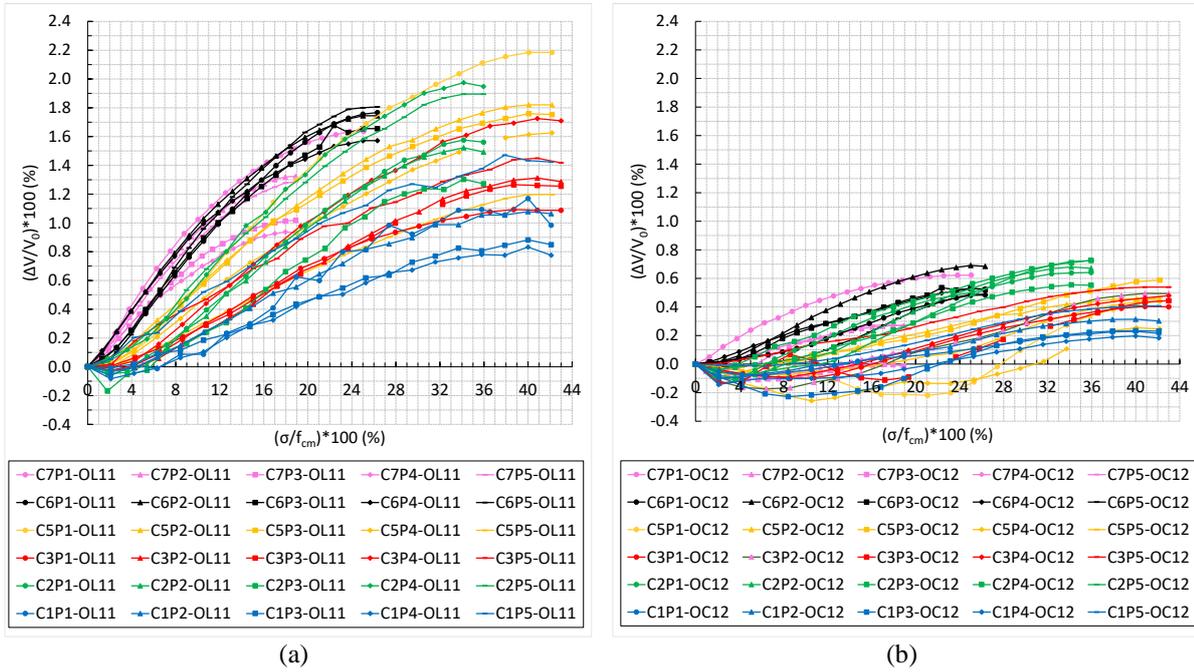
Figura 5.54 – Variação relativa da velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da tensão aplicada (σ) nas fases de descarregamento para as ondas: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.



Fonte: Autor.

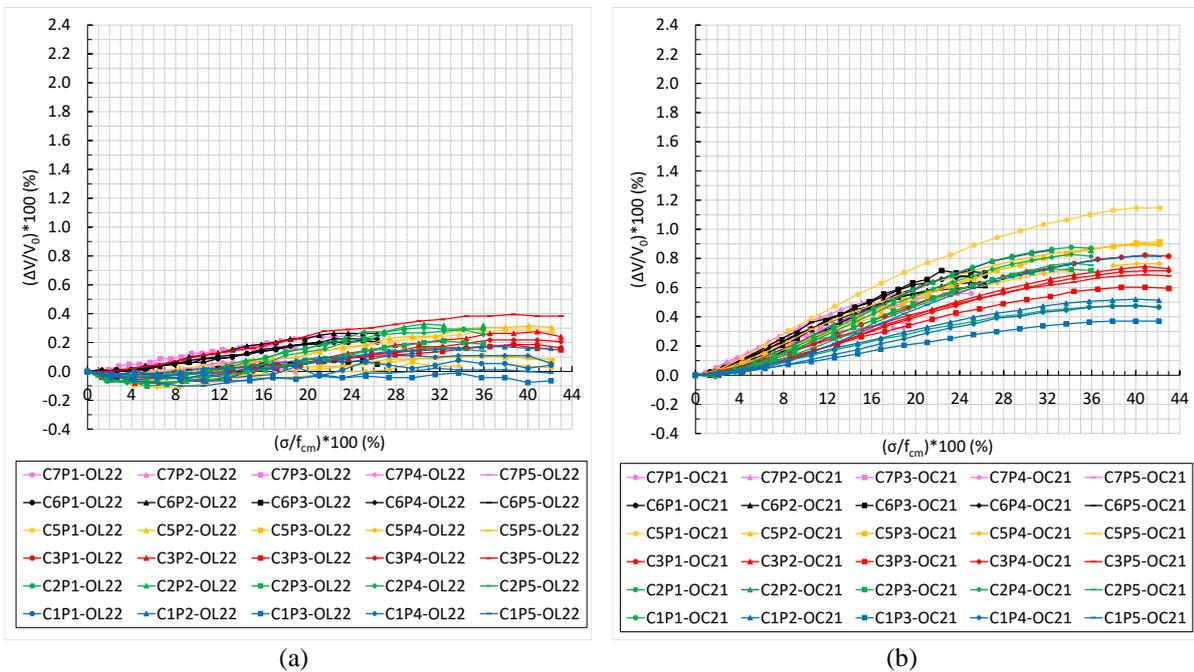
Também foram geradas as curvas da variação relativa da velocidade das ondas ($\Delta V/V_0$) em função da porcentagem de tensão (em relação ao f_{cm}) aplicada no prisma, σ/f_{cm} , conforme figuras 5.55 e 5.56.

Figura 5.55 – Variação relativa da velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da porcentagem de tensão aplicada (σ/f_{cm}) nas fases de descarregamento para as ondas: (a) OL₁₁ e (b) OC₁₂.



Fonte: Autor.

Figura 5.56 - Variação relativa da velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da porcentagem de tensão aplicada (σ/f_{cm}) nas fases de descarregamento para as ondas: (a) OL₂₂ e (b) OC₂₁.



Fonte: Autor.

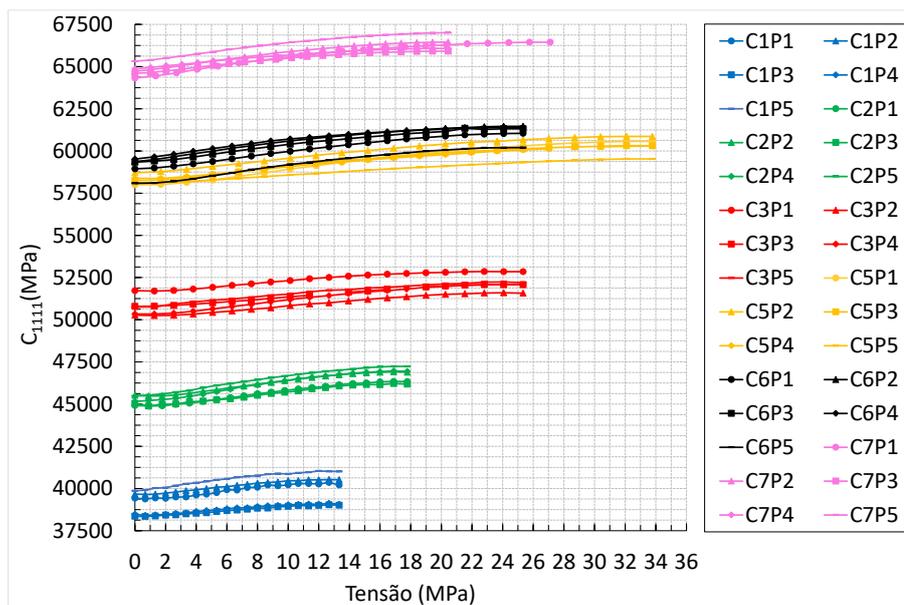
Nas figuras 5.53 e 5.54 ou 5.55 e 5.56, observou-se que houve prismas de mesmo traço que apresentaram curvas muito semelhantes, muito próximas. No entanto, também ocorreu de prismas de mesmo traço apresentarem curvas diferentes, bastante afastadas. Então, apesar de

os prismas de um mesmo traço terem sido concretados ao mesmo tempo (na mesma betonada), existiram fatores que influenciaram a variação relativa de velocidade durante o ensaio dos prismas, de modo que as curvas se tornaram diferentes. Neste trabalho, ainda não foi possível identificar que fatores foram estes. Eles podem, por exemplo, estarem relacionados com a umidade e/ou com a temperatura. Para verificar se esta influência realmente existe, poderiam ser realizados ensaios num mesmo corpo de prova submetido à diferentes condições de umidade e temperatura. Para isto, o ambiente para a realização dos ensaios precisaria ser bem controlado. O estudo na busca dos diferentes fatores que podem influenciar o efeito acustoelástico no concreto é importante para que se possa entender quais são as causas do afastamento das curvas acustoelásticas de prismas de mesmo traço.

Para os concretos de diferentes traços, observou-se que um dos fatores que influenciou a variação relativa de velocidade, além da tensão, foi o seu módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) ou a resistência à compressão média do material (f_{cm}). Conforme foi apresentado na tabela 5.1, quanto maior foi o f_{cm} do concreto, maior foi o E_{din} . Na figura 5.54b, referente às ondas OC_{21} , verificou-se que, para um mesmo valor de tensão aplicada em diferentes prismas, a maior variação relativa de velocidade ocorreu em prismas com menores valores de f_{cm} (ou menor E_{din}). Os prismas com f_{cm} menores, como os de concreto C1 e C2, apresentaram maiores valores de variação relativa de velocidade do que os prismas com f_{cm} maiores, como os de concreto C6 e o C7. As curvas dos prismas C3 e C5, com f_{cm} de valores intermediários aos dos prismas citados anteriormente, tiveram suas curvas numa posição intermediária à deles também. Apenas o comportamento entre as curvas dos prismas C1 e C2 é que foi diferente, pois, os prismas C1 possuem menor f_{cm} (ou menor E_{din}) do que os prismas C2 e as curvas destes ficaram acima das curvas dos prismas C1. Mas, no geral, foi observado o seguinte comportamento: concretos com menores valores de f_{cm} (ou menor E_{din}) apresentaram maior variação relativa de velocidade para um mesmo valor de tensão aplicada, ou seja, maior efeito acustoelástico. Para os outros tipos de onda, este comportamento não foi tão evidente, mas, em geral, também pôde ser observado. Nas figuras 5.55 e 5.56, nas quais a variação relativa de velocidade esteve em função da porcentagem de tensão aplicada, a influência do traço (seja por meio do f_{cm} ou do E_{din}) no efeito acustoelástico ficou mais evidente para os quatro tipos de ondas. Neste caso, observou-se que para um mesmo valor de porcentagem em relação ao f_{cm} , prismas com menores valores de f_{cm} geralmente apresentaram menores variações relativas de velocidade. Este comportamento faz sentido, pois, quando se aplica tensão equivalente à uma mesma porcentagem do f_{cm} em todos os prismas, significa que é aplicado um menor valor de tensão nos prismas com menor f_{cm} .

Enfim, verificou-se que a variação relativa de velocidade das ondas é influenciada pelo valor da tensão aplicada no material e também pelas propriedades do material, como o seu f_{cm} e o E_{din} . Provavelmente, existem outros fatores que também influenciam a variação relativa de velocidade das ondas. Caso contrário, as curvas dos prismas de mesmo traço e concretados na mesma betonada teriam sido todas coincidentes, ou muito semelhantes. Como já foi mencionado, podem existir fatores externos que influenciam o efeito acustoelástico, como a temperatura e a umidade. Sabendo-se da existência da influência da tensão e das propriedades do material na variação relativa de velocidade, foi feito um estudo a fim de relacionar estas variáveis. Usando os dados experimentais de variação relativa de velocidade, f_{cm} e E_{din} , foram obtidas equações empíricas para calcular o valor da tensão no material por meio do conhecimento dos valores destas variáveis. Além disto, sabe-se que o tensor constitutivo também varia com a tensão no material. Neste trabalho, foi proposto que esta variação ocorre de acordo com a equação 3.149. A figura 5.57 mostra como ocorreu a variação do elemento do tensor constitutivo C_{1111} para cada prisma ao utilizar esta equação. A variação do tensor ocorre de acordo com a variação de $\Delta V/V_0$. Portanto, a variação do tensor, além de ser influenciada pelo valor da tensão no material, também é pelas propriedades deste. Diante disto, também foram propostas equações que relacionaram o tensor constitutivo com a tensão, f_{cm} ou E_{din} . Deste modo, foram obtidas equações empíricas para estimar a tensão no material por meio de valores conhecidos do tensor, de f_{cm} ou de E_{din} . Este estudo é apresentado no subitem a seguir.

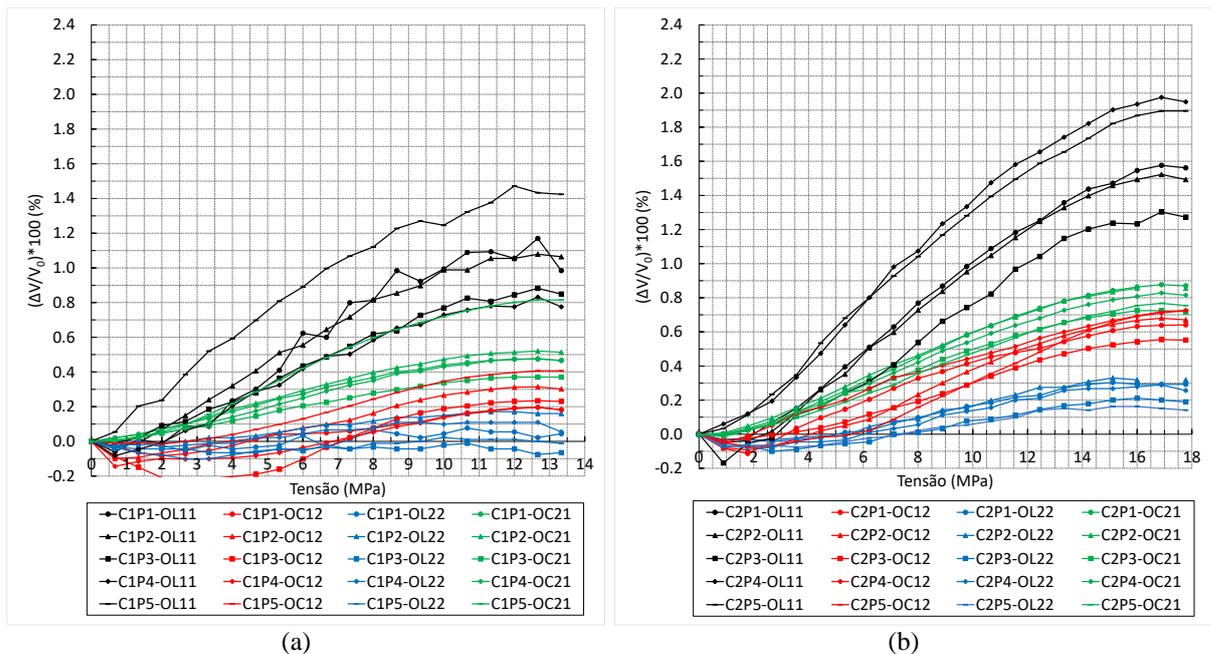
Figura 5.57 – Valor de C_{1111} em função da tensão aplicada em cada prisma.



Fonte: Autor.

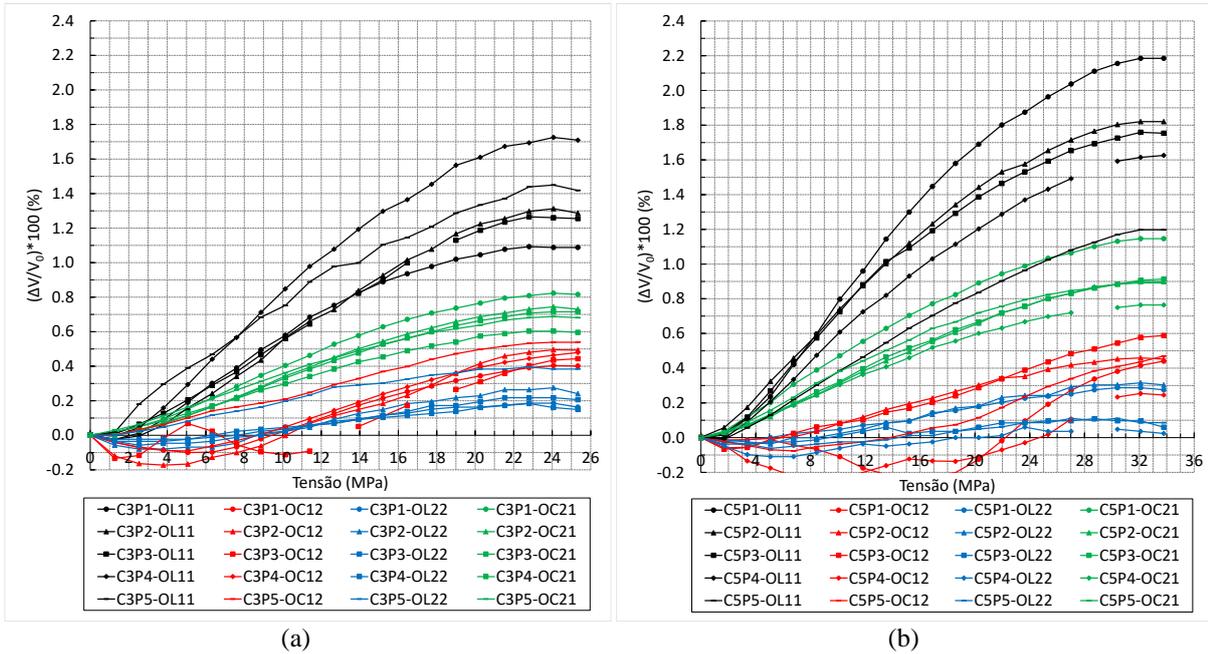
Sobre a sensibilidade das ondas ultrassônicas à tensão, as mais sensíveis foram as OL_{11} , pois, as curvas acustoelásticas apresentaram maior ganho de velocidade com o acréscimo de tensão. Na sequência, foram as ondas OC_{21} , OC_{12} e OL_{22} em ordem decrescente de sensibilidade. Por meio das figuras 5.58 à 5.60 é possível observar com mais clareza a sensibilidade à tensão para cada tipo de onda ultrassônica. Cada figura é referente à um mesmo traço de concreto e apresenta as curvas acustoelásticas para as ondas OL_{11} , OC_{21} , OC_{12} e OL_{22} dos 5 prismas ensaiados de um mesmo traço. Observa-se que houve apenas alguns casos em que a ordem de sensibilidade à tensão mostrada anteriormente não foi seguida. Por exemplo, no prisma $C7P3$ as ondas OL_{22} foram mais sensíveis do que as OC_{12} , no entanto, na maior parte dos casos, verificou-se que ocorre o contrário.

Figura 5.58 - Variação relativa de velocidade em função da tensão das ondas OL_{11} , OC_{21} , OC_{12} e OL_{22} para os prismas do concreto: (a) C1 e (b) C2.



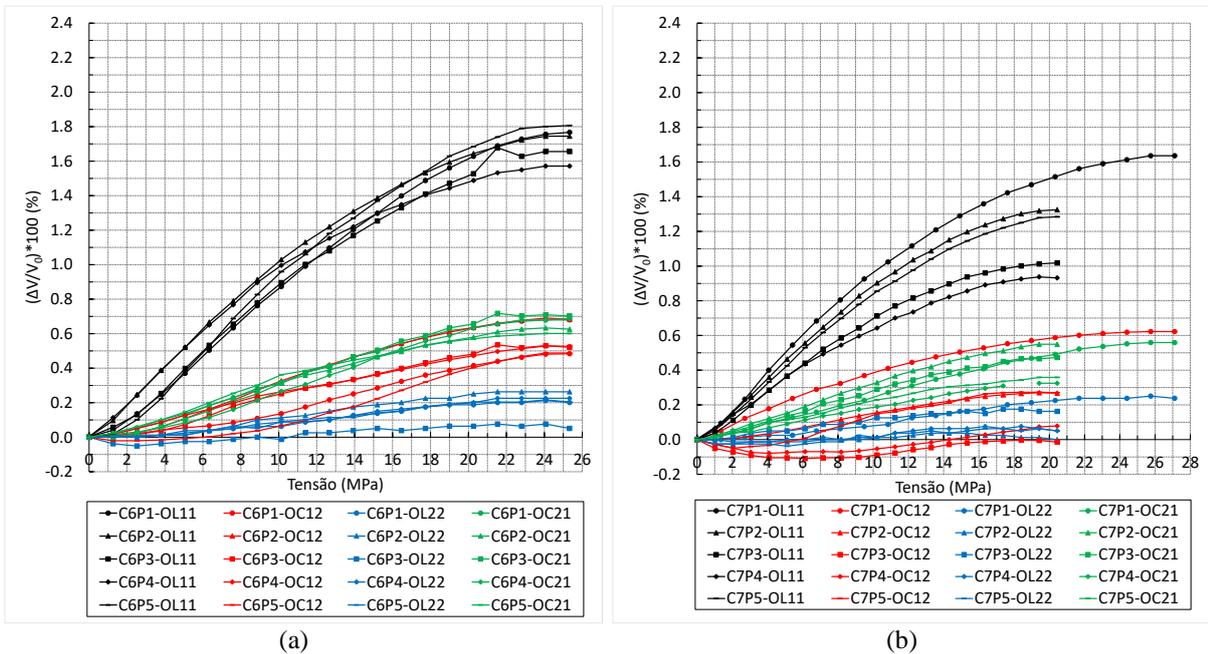
Fonte: Autor.

Figura 5.59 - Variação relativa de velocidade em função da tensão das ondas OL₁₁, OC₂₁, OC₁₂ e OL₂₂ para os prismas do concreto: (a) C3 e (b) C5.



Fonte: Autor.

Figura 5.60 - Variação relativa de velocidade em função da tensão das ondas OL₁₁, OC₂₁, OC₁₂ e OL₂₂ para os prismas do concreto: (a) C6 e (b) C7.



Fonte: Autor.

Sobre as figuras 5.53 à 5.56, as curvas que apresentaram menores não linearidades no início do carregamento foram as referentes às OL₁₁ (figuras 5.53a e 5.55a) e às OC₂₁ (figuras 5.54b e 5.56b). Além disto, como foi visto, estes tipos de ondas foram as mais sensíveis à tensão, ou seja, apresentaram o maior efeito acustoelástico. As ondas OC₁₂ apresentaram trechos de

não linearidade inicial que abrangeram grande parte do carregamento de alguns prismas (figuras 5.53b e 5.55b). Além disto, para alguns prismas, este trecho também resultou numa grande diminuição nos valores da velocidade. São exemplos as curvas dos prismas: C1P3, C1P4, C3P2, C3P3, C3P3, C5P1 e C5P4. As curvas das ondas OL₂₂ apresentaram o menor efeito acustoelástico (figuras 5.54a e 5.56a). Então, ao analisar os prismas de diferentes traços, verificou-se um padrão no comportamento para as curvas acustoelásticas: as ondas OL₁₁ e as OC₂₁ foram as que apresentaram curvas com o melhor comportamento, tanto em relação à não linearidade inicial quanto em relação à sensibilidade à tensão. Diante destes resultados, conclui-se que as ondas OL₁₁ e as OC₂₁ seriam as mais adequadas para serem utilizadas na avaliação de tensões com o uso do ultrassom. Na prática, as ondas OC₂₁ poderiam ser emitidas pelo método da transmissão direta. No entanto, isto não poderia ser feito para as ondas OL₁₁, pois, nas estruturas *in situ* não se tem acesso às extremidades dos elementos estruturais. Por este motivo, também foi realizado um estudo sobre o efeito acustoelástico no concreto ao emitir as ondas OL₁₁ pelo método de transmissão indireta. Este estudo está apresentado mais adiante no subitem 5.4.

5.3.2 Determinação de uma equação empírica para obter a tensão a partir de C^σ , f_{cm} ou E_{din}

Com o objetivo de obter equações que relacionassem o valor da tensão aplicada no concreto (σ) com os valores do tensor constitutivo (C^σ), do f_{cm} ou do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}), foram gerados dois tipos de equações empíricas (equações de superfície) para cada tipo de onda ultrassônica. Um tipo de equação relaciona o tensor constitutivo e o f_{cm} do concreto com a tensão aplicada (caso 1) e o outro relaciona o tensor constitutivo e o E_{din} com a tensão aplicada (caso 2). Serão apresentadas as equações referentes às ondas OL₁₁ e OC₂₁, pois, foram as que proporcionaram os melhores ajustes, com coeficientes de determinação (R^2) em torno de 0.8. As equações para as ondas OL₂₂ e OC₁₂ apresentaram coeficientes de determinação abaixo de 0.6. O software utilizado para gerar as equações de superfície foi o LabFit, desenvolvido por Wilton e Cleide Pereira da Silva da Universidade Federal de Campina Grande. Os dois casos estudados são apresentados a seguir.

Caso 1: Com base nos resultados experimentais, foi realizada uma regressão múltipla para determinar uma equação que relacionasse as seguintes variáveis: $(1+\Delta V/V_0)^2$, f_{cm} e σ/f_{cm} . Da equação 3.149, verifica-se que, para ondas longitudinais e de cisalhamento, $C^\sigma/C^0=(1+\Delta V/V_0)^2$. Onde C^σ é o elemento do tensor constitutivo quando existe tensão aplicada no material

e C^0 é o elemento do tensor constitutivo quando esta tensão é nula. Portanto, o tensor constitutivo, C^σ , está sendo relacionado com a tensão aplicada na equação de regressão por meio do termo $(1 + \Delta V/V_0)^2$. Então, a regressão múltipla consistiu na equação de uma superfície, cujas variáveis independentes foram $(1 + \Delta V/V_0)^2$ e f_{cm} e a variável dependente foi σ/f_{cm} .

Caso 2: Neste caso, as variáveis relacionadas foram: $(1 + \Delta V/V_0)^2$, E_{din} e σ . Então, a regressão múltipla consistiu na equação de uma superfície, cujas variáveis independentes foram $(1 + \Delta V/V_0)^2$ e E_{din} e a variável dependente foi σ .

As equações obtidas para as ondas OL_{11} e OC_{21} abordando cada um destes casos são apresentadas a seguir.

5.3.2.1 Equações para as ondas OC_{21}

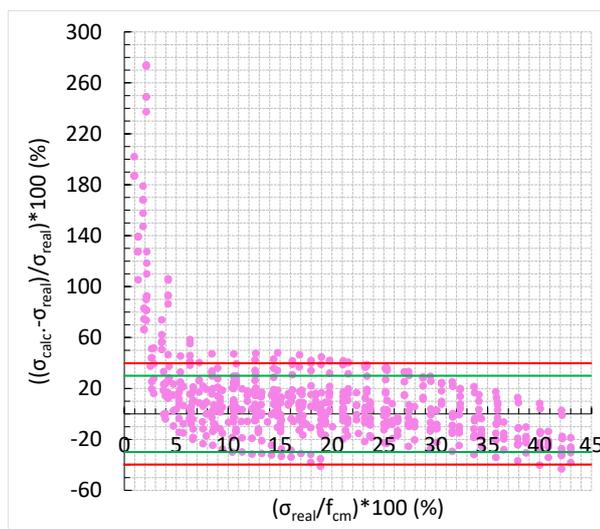
Os dados experimentais de variação relativa de velocidade das ondas OC_{21} foram utilizados para calcular o termos $(1 + \Delta V/V_0)^2$. Portanto, este termo foi calculado para cada valor de tensão aplicada em cada um dos 30 prismas. A equação de superfície encontrada para relacionar $(1 + \Delta V/V_0)^2$, f_{cm} e σ/f_{cm} (caso 1) foi a equação 5.3. A equação que relaciona $(1 + \Delta V/V_0)^2$, E_{din} e σ (caso 2) é a equação 5.4.

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = 1.4289 f_{cm}^{\left(-0.1176 - 0.7512 / \left(1 + \frac{\Delta V}{V_0}\right)^2\right)}; R^2 = 0.86 \quad (5.3)$$

$$\sigma = 2.9551 \times 10^{-9} E_{din}^{\left(2.2092 - 0.3056 / \left(1 + \frac{\Delta V}{V_0}\right)^2\right)}; R^2 = 0.89 \quad (5.4)$$

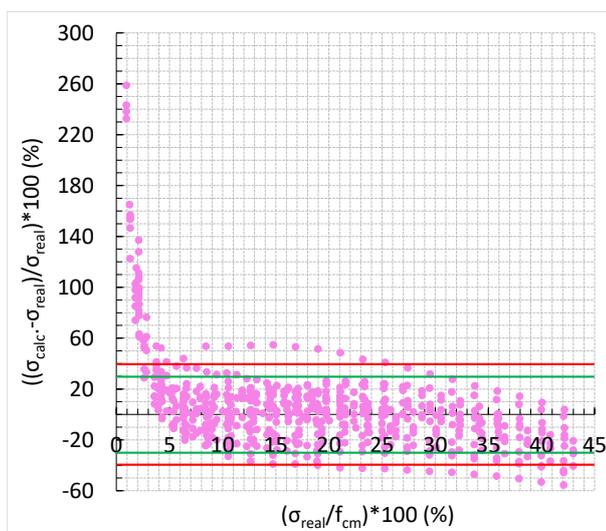
Ambas as equações foram usadas para calcular os valores de tensão (σ_{calc}) a partir dos valores experimentais de $(1 + \Delta V/V_0)^2$ e f_{cm} , para a equação 5.3, e de $(1 + \Delta V/V_0)^2$ e E_{din} para a equação 5.4. As figuras 5.61 e 5.62 mostram o erro relativo que existiu no cálculo das tensões em função da porcentagem de tensão real aplicada (σ_{real}/f_{cm}) nos prismas nos casos 1 e 2, respectivamente. O erro relativo é dado por: $(\sigma_{calc} - \sigma_{real})/\sigma_{real}$. As linhas em vermelho localizadas acima e abaixo do eixo das abscissas indicam erros de +40% e -40%, respectivamente. Já as linhas em verde, indicam erros de +30% e -30%.

Figura 5.61 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.3 (caso 1 – OC₂₁).



Fonte: Autor.

Figura 5.62 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.4 (caso 2 – OC₂₁).



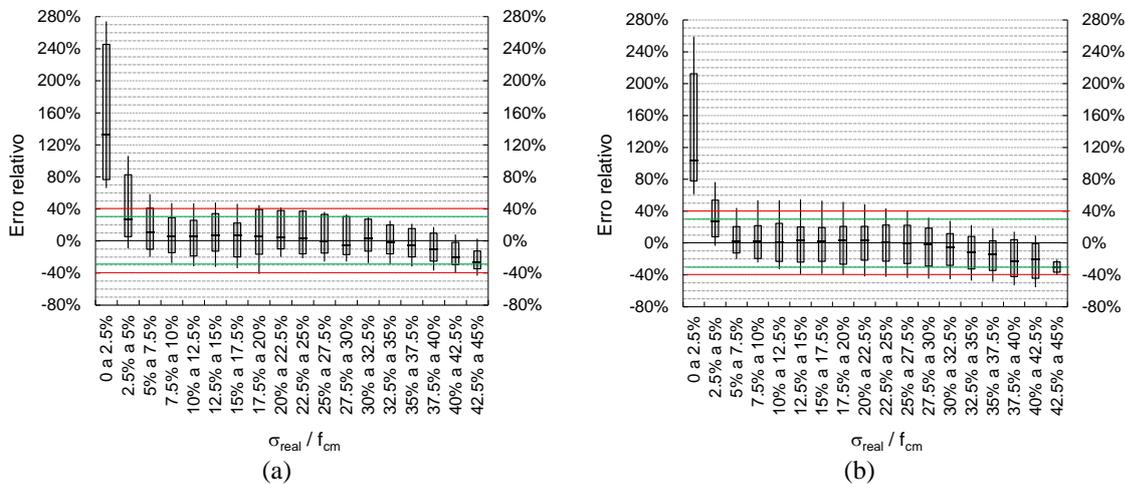
Fonte: Autor.

Nas figuras 5.61 e 5.62, observou-se que existe um intervalo de erro relativo formado por um valor máximo e mínimo de erro para cada valor de tensão real aplicada. Este intervalo diminuiu com o aumento da tensão aplicada no concreto. Então, quanto maior foi a tensão aplicada no concreto, menor foi o intervalo do erro relativo. Para porcentagens de tensões abaixo de $5\%f_{\text{cm}}$, os erros são bastante elevados. Porém, eles diminuem consideravelmente quando as tensões aplicadas estiveram acima de $5\%f_{\text{cm}}$. No caso 1 (figura 5.61), quando as tensões reais aplicadas foram menores do que $20\%f_{\text{cm}}$, o erro mínimo foi de -40% e o máximo de 48% . Para tensões reais acima de $20\%f_{\text{cm}}$, o intervalo de erro ficou entre $\pm 40\%$. No entanto,

no caso 2, observou-se maiores erros relativos no cálculo das tensões do que no caso 1 (ver figura 5.62) para carregamentos aplicados acima dos $5\%f_{cm}$. Os erros ficaram acima de $+40\%$ ou abaixo de -40% ao longo de todo o carregamento dos elementos. Houve uma variação de $\pm 55\%$ nos erros. Entre a tensão real aplicada de $5\%f_{cm}$ e $25\%f_{cm}$, os erros foram superiores à $+40\%$. Para tensões reais aplicadas superiores à $25\%f_{cm}$, os erros estiveram abaixo de $+40\%$, mas, foram inferiores à -40% .

Na figura 5.63, são apresentados gráficos nos quais as linhas verticais indicam o intervalo de variação dos erros relativos para cada intervalo de 2.5% de tensão aplicada no prisma. Então, é possível verificar quais foram os erros máximos e mínimos obtidos no cálculo da tensão para cada intervalo de 2.5% de tensão aplicada. Nestes gráficos, as caixas indicam qual é o intervalo de erro para 80% dos pontos contidos dentro de um intervalo de 2.5% de tensão aplicada. As retas horizontais na cor vermelha estão indicando os erros de $\pm 40\%$ e, na cor verde, erros de $\pm 30\%$. Os gráficos das figuras 5.63a e 5.63b foram desenvolvidos para os casos 1 e 2, respectivamente.

Figura 5.63 - Intervalos de erros relativos das medidas de tensão calculadas para cada intervalo de 2.5% de tensão real aplicada no concreto ao usar para o cálculo da tensão: (a) equação 5.3 (caso 1- OC₂₁) e (b) equação 5.4 (caso 2 - OC₂₁).



Fonte: Autor.

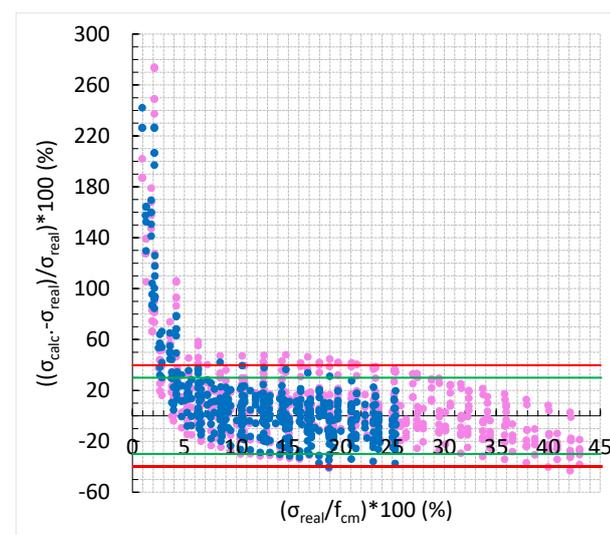
Na figura 5.63a, notou-se que, além de os erros mínimos e máximos ficarem dentro do intervalo de $\pm 40\%$ a partir de um carregamento equivalente à $20\%f_{cm}$, 80% das medidas calculadas apresentaram erros menores do que $\pm 40\%$ para carregamentos a partir de $5\%f_{cm}$. Além disto, acima de $25\%f_{cm}$, 80% das medidas calculadas estão com erros de $\pm 30\%$. O gráfico da figura 5.63b mostra que os intervalos abrangendo os valores máximos e mínimos de erro são maiores para o caso 2. No entanto, 80% das medidas de tensão calculadas apresentaram

intervalos de erro relativo de $\pm 30\%$, a partir da tensão real aplicada equivalente à $5\%f_{cm}$. Somente para os carregamentos aplicados acima de $37.5\%f_{cm}$ que este valor atingiu um valor mínimo mais alto, em torno de -45% .

Para tentar minorar os erros relativos encontrados para cargas mais baixas do caso 1, foi gerada outra equação de superfície abrangendo apenas os dados experimentais de $(1 + \Delta V/V_0)^2$ correspondentes à tensões aplicadas de até $25\%f_{cm}$. A equação resultante foi a 5.5. Na figura 5.64, os pontos em azul representam os erros relativos ao calcular as tensões usando a equação 5.5. Os pontos em rosa mostram o gráfico da figura 5.61, cujos pontos representam o erro relativo ao calcular a tensão usando a equação 5.3.

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = 0.5994 f_{cm}^{\left(-0.0377 - 0.6918 \left(1 + \frac{\Delta V}{V_0}\right)^2\right)}; R^2 = 0.88 \quad (5.5)$$

Figura 5.64-Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.3, em rosa, e a equação 5.5, em azul, (caso 1- OC₂₁).

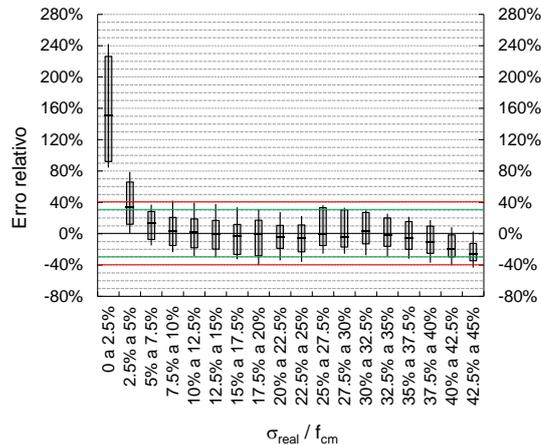


Fonte: Autor.

Observou-se, na figura 5.64, que utilizar a equação 5.5 no lugar da equação 5.3 para calcular as tensões nos prismas resultou em menores erros no cálculo das tensões quando a porcentagem de tensão aplicada foi de até $25\%f_{cm}$. Com isto, os erros máximos e mínimos que antes eram de $\pm 40\%$ a partir de uma porcentagem de tensão aplicada de $20\%f_{cm}$ passaram a ser de $\pm 40\%$ a partir da porcentagem de tensão aplicada de $5\%f_{cm}$. Esta observação fica bem clara na figura 5.65. O gráfico desta figura foi desenvolvido até $25\%f_{cm}$ usando a equação 5.5 e para valores acima de $25\%f_{cm}$ usando a equação 5.3. A partir de $5\%f_{cm}$, todas as medidas de tensão

calculadas apresentaram erros dentro de $\pm 40\%$. Notou-se também, nesta figura, que a partir de $5\% f_{cm}$, 80% das medidas calculadas apresentaram erros de $\pm 30\%$.

Figura 5.65 - Intervalos de erros relativos das medidas de tensão calculadas para cada intervalo de 2.5% de tensão real aplicada no concreto ao usar para o cálculo da tensão a equação 5.5 até $25\% f_{cm}$ e a equação 5.3 acima de $25\% f_{cm}$ (caso 1– OC₂₁).

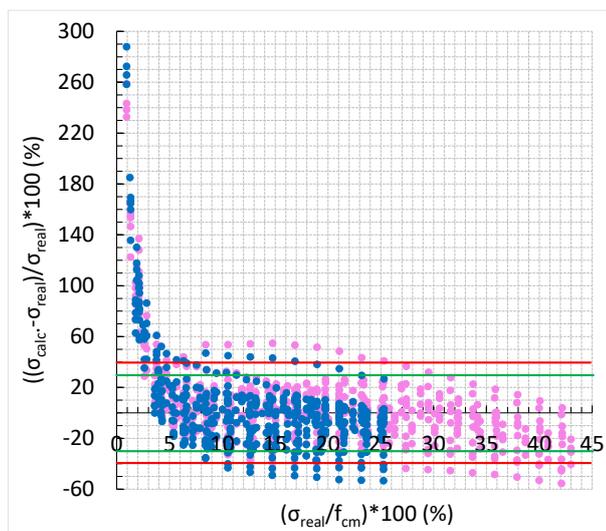


Fonte: Autor.

Na tentativa de melhorar os erros encontrados no caso 2, também foi realizada uma nova regressão a fim de encontrar uma equação a partir dos dados experimentais obtidos para tensões aplicadas de até $25\% f_{cm}$ (equação 5.6). No entanto, esta nova equação não gerou erros melhores para este trecho de análise das tensões, como pode ser observado na figura 5.66. Os pontos em rosa e em azul são os erros relativos obtidos com as equações 5.4 e 5.6, respectivamente. Antes, com a equação 5.4, ocorria uma superestimativa do valor da tensão de até 55% quando a porcentagem de tensão real aplicada era de até $25\% f_{cm}$. Com a equação 5.6 passou a ocorrer o contrário, pois, as tensões calculadas até este valor de tensão aplicada no prisma foram subestimadas em até 55%. Entre superestimar e subestimar o valor da tensão no elemento de concreto, a primeira situação é favorável com relação à segurança. Portanto, no caso 2, a equação 5.4 foi considerada a mais adequada na estimativa das tensões ao longo de todo o carregamento dos prismas do que uma combinação desta com a equação 5.6.

$$\sigma = 1.602 \times 10^{-11} E_{din} \left(\frac{2.6761 - 0.287 \left(1 + \frac{\Delta V}{V_0} \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta V}{V_0} \right)^2} \right); R^2 = 0.91 \quad (5.6)$$

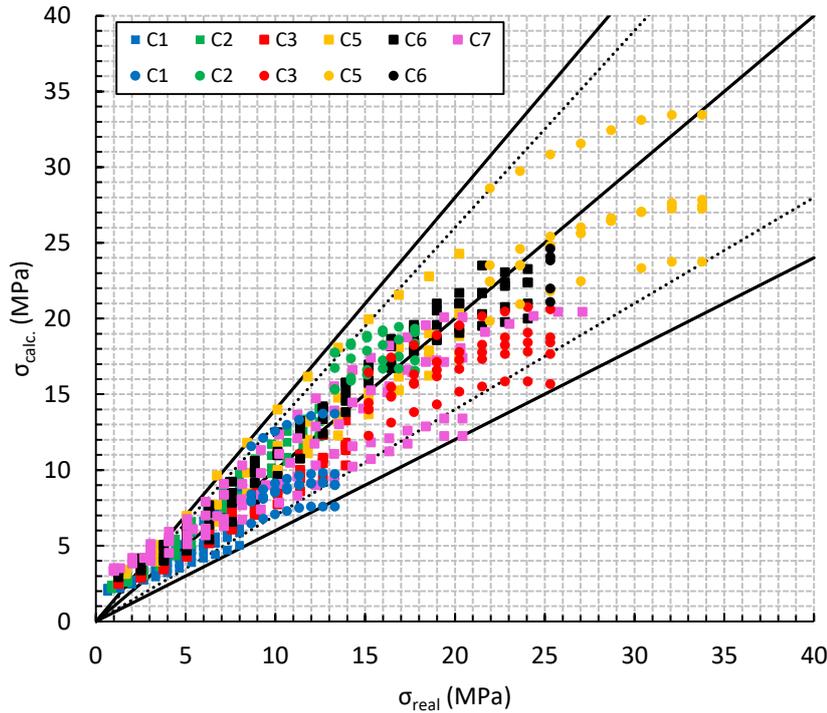
Figura 5.66 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.4, em rosa, e a equação 5.6, em azul, (caso 2– OC₂₁).



Fonte: Autor.

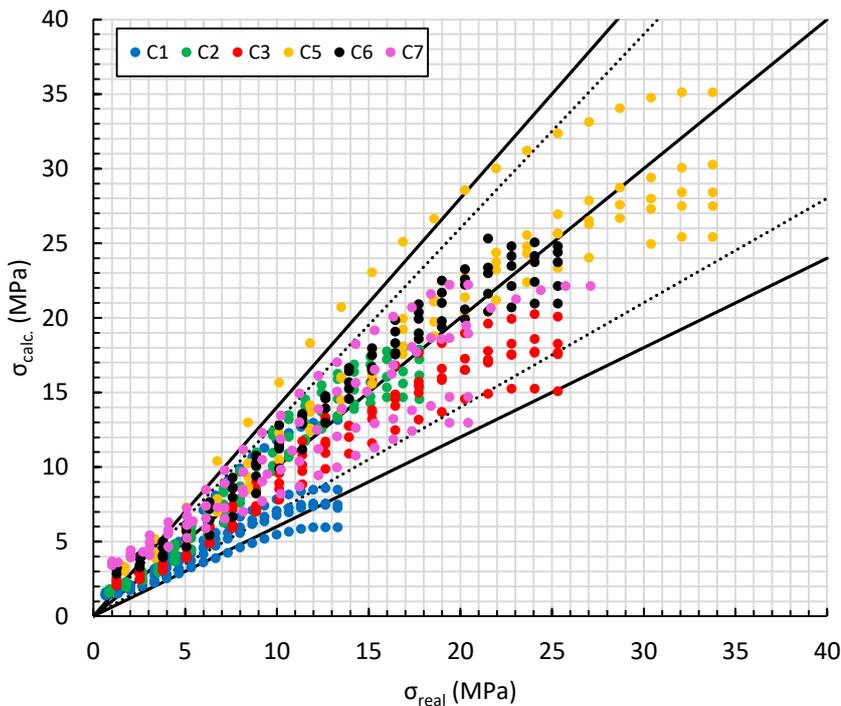
As figuras 5.67 e 5.68 mostram os valores da tensão calculada em função da tensão real aplicada nos prismas para os casos 1 e 2, respectivamente. Na figura 5.67, o cálculo das tensões foi realizado utilizando a equação 5.3 quando as tensões reais aplicadas foram maiores do que $25\%f_{\text{cm}}$ (marcadores circulares) e a equação 5.5 quando as tensões reais estiveram abaixo de $25\%f_{\text{cm}}$ (marcadores quadrangulares). Na figura 5.68, as tensões foram calculadas utilizando apenas a equação 5.4. Em ambas as figuras, a reta inclinada central, na cor preta, indica valores de tensões calculadas iguais aos valores de tensões reais aplicadas nos prismas. As retas inclinadas contínuas acima e abaixo da reta central indicam valores de tensões calculadas com erros de +40% e de -40%, respectivamente. Já as retas inclinadas tracejadas acima e abaixo da reta central, indicam tensões calculadas com erros de +30% e de -30%, respectivamente.

Figura 5.67 - Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 1 (OC₂₁) ao usar as equações 5.5 e 5.3 quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} e maiores que 25% f_{cm} , respectivamente.



Fonte: Autor.

Figura 5.68 - Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 2 (OC₂₁) ao usar a equação 5.4 para todo o carregamento.



Fonte: Autor.

Observou-se que, para o caso 1 (figura 5.67), a partir de 5 MPa de tensão real aplicada no concreto, praticamente todas tensões foram calculadas com erros contidos dentro do cone

formado pelas linhas inclinadas contínuas, ou seja com um intervalo de erro de no máximo 40%. Notou-se também que quando a tensão aplicada foi maior do que 10 MPa, a maioria das medidas estiveram dentro do cone formado pelas linhas tracejadas, isto é, apresentaram erros de no máximo 30%. Existiram poucas medidas de tensão calculadas para fora deste cone. Para o caso 2 (figura 5.68), notou-se uma quantidade maior de tensões calculadas com erros superiores à +40% e inferiores à -40% em relação ao caso 1. No entanto, esta diferença entre os dois casos é pequena. Verifica-se, no caso 2, que a maior parte das medidas de tensão calculadas ainda estão dentro do cone que indica erros de $\pm 40\%$. Para valores de tensão real acima de 20MPa, todas as medidas estão contidas nele.

Tanto para o caso 1 quanto para o caso 2, observou-se que existiu a seguinte tendência no cálculo das tensões: quanto maior foi o valor das tensões aplicadas no concreto, menores foram os intervalos dos erros relativos no cálculo das tensões (ver figuras 5.61 à 5.63). No entanto, para cargas mais elevadas, acima de $25\%f_{cm}$, ocorreu também uma tendência de calcular as tensões com valores menores do que as reais, ou seja, de subestimar as tensões (ver figuras 5.61 à 5.63). Nas figuras 5.67 e 5.68, também verificou-se esta tendência para cargas mais elevadas. Observou-se também que as tensões calculadas com a equações encontradas para o caso 1 (equações 5.3 e 5.5), a partir dos valores conhecidos de f_{cm} e do tensor, forneceram menores erros do que aquelas calculadas usando a equação obtida para o caso 2 (equação 5.4) a partir de valores conhecidos de E_{din} e do tensor. No entanto, em ambos os casos a maioria das tensões calculadas estiveram contidas dentro de um intervalo de erro de $\pm 40\%$.

5.3.2.2 Equações para as ondas OL_{11}

Os dados experimentais de variação relativa de velocidade das ondas OL_{11} foram utilizados para calcular o termos $(1 + \Delta V/V_0)^2$. As equações determinadas para os casos 1 e 2 foram as 5.7 e 5.8, respectivamente. A fim de melhorar os erros no cálculo das tensões dentro do intervalo de porcentagem de tensão aplicada de até $25\%f_{cm}$, foram geradas novas equações com os dados experimentais obtidos até este nível de tensão aplicada. As equações resultantes para os casos 1 e 2 são as 5.9 e 5.10, respectivamente.

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = 2.656f_{cm}^{\left(-0.4079-0.7819/\left(1+\frac{\Delta V}{V_0}\right)^2\right)}; R^2=0.79 \quad (5.7)$$

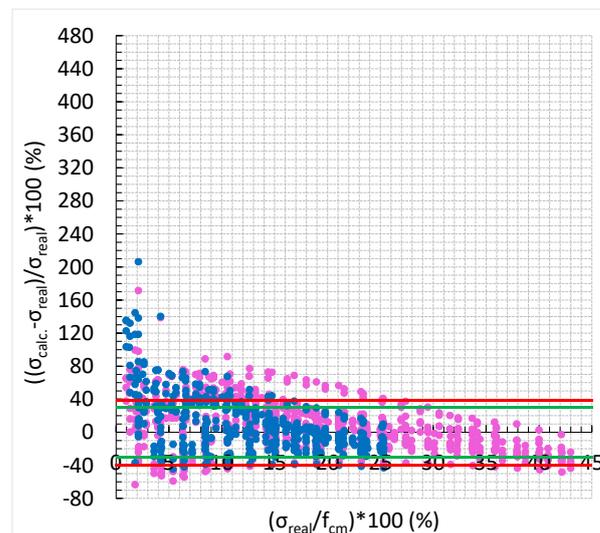
$$\sigma = 3.474 \left[\left(1 + \frac{\Delta V}{V_0} \right)^2 \right]^{(1.511-26840/E_{din})} ; R^2=0.8 \quad (5.8)$$

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = 1.499 f_{cm}^{\left(\frac{-0.3494-0.6224}{\left(1 + \frac{\Delta V}{V_0} \right)^2} \right)} ; R^2=0.82 \quad (5.9)$$

$$\sigma = 3.195 \left[\left(1 + \frac{\Delta V}{V_0} \right)^2 \right]^{(1.7199-37890/E_{din})} ; R^2=0.88 \quad (5.10)$$

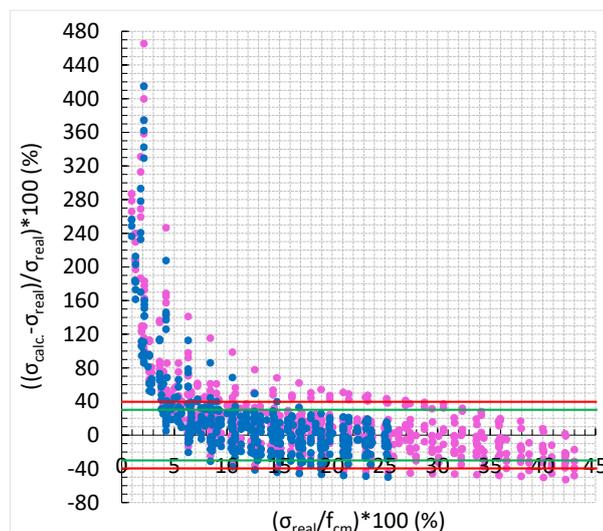
As figuras 5.69 e 5.70 mostram o erro relativo que existiu no cálculo das tensões em função da porcentagem de tensão real aplicada (σ_{real}/f_{cm}) nos prismas para os casos 1 e 2, respectivamente. Nestas figuras, os pontos em rosa representam os erros obtidos ao utilizar as equações 5.7 e 5.8 para os casos 1 e 2, respectivamente. Os pontos em azul representam os erros obtidos com o uso das equações 5.9 e 5.10 para os casos 1 e 2, respectivamente. As linhas em vermelho e verde indicam os erros de $\pm 40\%$ e $\pm 30\%$, respectivamente.

Figura 5.69 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.7, em rosa, e a equação 5.9, em azul, (caso 1- OL₁₁).



Fonte: Autor.

Figura 5.70 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.8, em rosa, e a equação 5.10, em azul, (caso 2- OL₁₁).



Fonte: Autor.

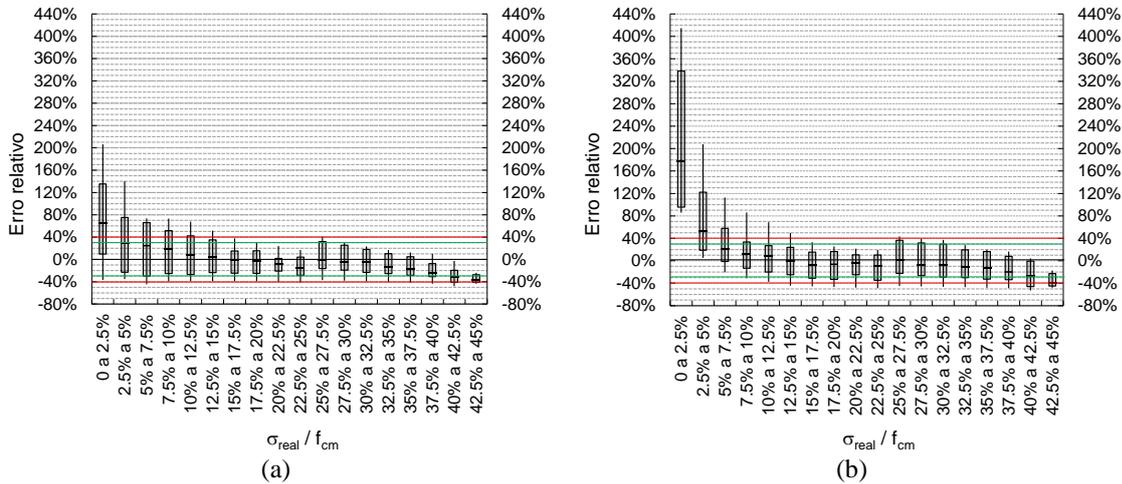
Assim como para as ondas OC₂₁, os erros relativos para carregamentos de até 5% f_{cm} são bastante elevados, mas, caem consideravelmente para carregamentos superiores à 5% f_{cm} (figuras 5.69 e 5.70). Além disto, também foi observado que os intervalos de erros mínimos e máximos diminuíram com o acréscimo de tensão no concreto. Em ambos os casos para as ondas OL₁₁, observou-se uma redução nos erros relativos ao utilizar as equações 5.9 e 5.10 no lugar das equações 5.7 e 5.8 para calcular as tensões quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} . No caso 1 (figura 5.69), os erros estavam bastante acima de +40% até este nível de tensão aplicada. Ao usar a equação 5.9, os erros reduziram para +40% entre 15% f_{cm} e 25% f_{cm} . No caso 2, esta redução nos erros também foi encontrada dentro deste intervalo de tensão aplicada. No entanto, no caso 2, houveram erros abaixo de -40% a partir de 5% f_{cm} , o que não foi observado para o caso 1 (com exceção dos erros para as cargas em torno de 40% f_{cm}).

Ao comparar os erros obtidos para o caso 1 das ondas OC₂₁ e OL₁₁ (figuras 5.64 e 5.69), verificou-se que eles foram menores para as ondas OC₂₁. Pois, os erros foram mantidos dentro do intervalo de $\pm 40\%$ a partir da porcentagem de tensão real aplicada de 5% f_{cm} (figura 5.64). Lembrando que foi admitida a equação 5.5 para tensões reais de até 25% f_{cm} (pontos em azul da figura 5.64). Para as ondas OL₁₁, os erros ficaram entre $\pm 40\%$ a partir do carregamento real de 15% f_{cm} (pontos azuis da figura 5.69).

A figura 5.71 mostra os erros relativos máximos e mínimos para cada intervalo de tensão real aplicada de 2.5% f_{cm} para os casos 1 e 2 das ondas OL₁₁. Na figura 5.71a (caso 1), o gráfico foi feito usando a equação 5.9 até a tensão real aplicada de 25% f_{cm} e a equação 5.7 para tensões reais acima deste valor. Na figura 5.71b (caso 2), o gráfico foi gerado da mesma maneira, mas

usando as equações 5.10 e 5.8. Observou-se que o caso 1 das ondas OC_{21} (figura 5.65) apresentou menores erros do que os casos 1 e 2 das ondas OL_{11} .

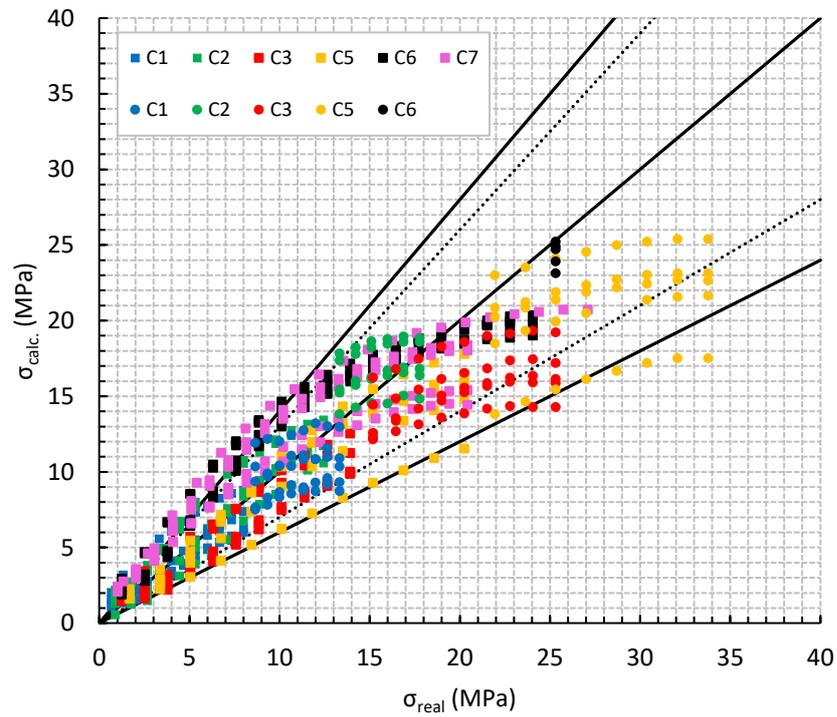
Figura 5.71 - Intervalos de erros relativos das medidas de tensão calculadas para cada intervalo de 2.5% de tensão real aplicada no concreto ao usar para o cálculo da tensão: (a) a equação 5.9 até $25\%f_{cm}$ e a equação 5.7 acima de $25\%f_{cm}$ (caso 1 – OL_{11}) e (b) a equação 5.10, até $25\%f_{cm}$ e a equação 5.8, acima de $25\%f_{cm}$ (caso 2 – OL_{11})



Fonte: Autor.

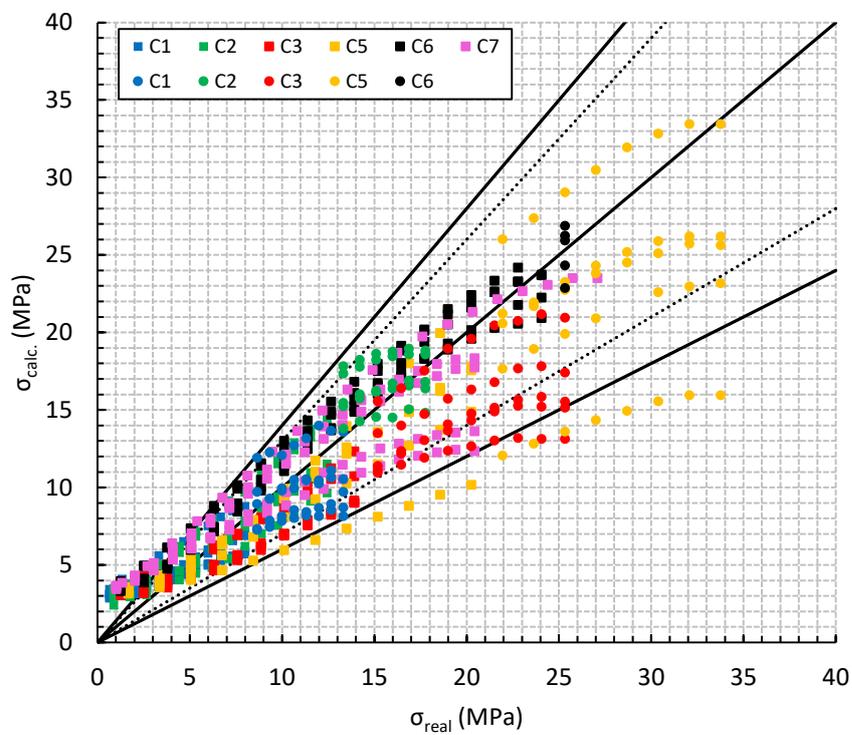
As figuras 5.72 e 5.73 mostram as tensões calculadas em função das tensões reais para os casos 1 e 2, respectivamente, das ondas OL_{11} . Os marcadores quadrangulares e circulares indicam as tensões calculadas ao usar as equações 5.9 e 5.7, respectivamente, para o caso 1 e ao usar as equações 5.10 e 5.8, respectivamente, para o caso 2.

Figura 5.72 -Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 1 (OL₁₁) ao usar as equações 5.9 e 5.7 quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} e maiores que 25% f_{cm} , respectivamente.



Fonte: Autor.

Figura 5.73 -Tensão calculada (σ_{cal}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 2 (OL₁₁) ao usar as equações 5.10 e 5.8 quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} e maiores que 25% f_{cm} , respectivamente.



Fonte: Autor.

Observou-se, no caso 1, que existiu uma quantidade maior de tensões calculadas com erros superiores a +40% do que no caso 2. No caso 2, ocorreu o contrário. Houve maior quantidade de tensões calculadas com erros inferiores à -40% do que no caso 1. No geral, para ambos os casos, verificou-se que a maioria dos valores de tensão calculados estiveram com erros entre $\pm 40\%$. No entanto, ao comparar com os erros obtidos no caso 1 das ondas OC₂₁ (figura 5.67), nota-se que este caso com este tipo de onda continua fornecendo os menores erros no cálculo das tensões. Pois, como foi visto, a partir de 5 MPa de tensão real aplicada no concreto, praticamente todas as medidas de tensão foram calculadas com erros dentro do intervalo de $\pm 40\%$.

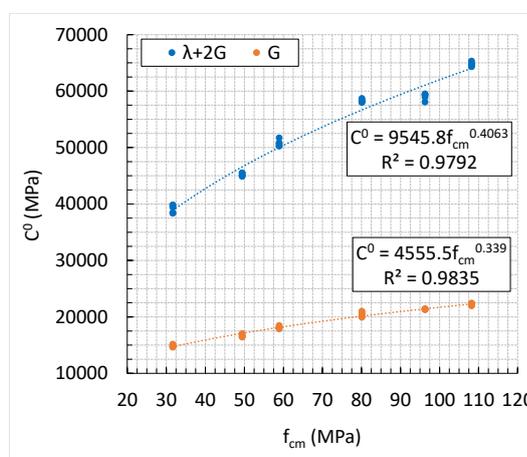
Assim como foi observado nos resultados referentes às ondas OC₂₁, com as equações para as ondas OL₁₁ existiu uma tendência de calcular valores de tensões abaixo dos valores reais conforme a tensão real aplicada no concreto foi maior. Ou seja, houve uma tendência de subestimar as tensões reais.

5.3.2.3 Obtenção do valor de C^0

Se as equações de superfície encontradas para as ondas OC₂₁ ou OL₁₁ fossem utilizadas para estimar o valor de tensão num elemento de concreto, seria necessário que fossem conhecidos: $(1 + \Delta V/V_0)^2$ e f_{cm} ou E_{din} , a depender do caso (1 ou 2) que se escolhesse usar. O valor do termo $(1 + \Delta V/V_0)^2$ seria determinado pelo cálculo de C^σ/C^0 para ondas longitudinais e de cisalhamento. Os valores de C^σ poderiam ser obtidos ao emitir as ondas ultrassônicas no elemento que se quer avaliar (que estaria com tensão) e ao substituir o valor encontrado para as velocidades nas equações 3.138 ou 3.139 (a depender do tipo de onda emitida), referentes às ondas longitudinais e de cisalhamento, respectivamente. Já o valor de C^0 poderia ser obtido por meio de um gráfico que relacionasse esta constante com o f_{cm} do material. Carrazedo et al. (2018) realizaram um estudo para relacionar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto com o f_{cm} e encontraram um bom ajuste para a curva, com R^2 de 0.88. De modo semelhante, poderia ser feito um estudo a fim de relacionar C^0 com o f_{cm} do concreto. Com isto, esta constante também seria um valor conhecido. Neste trabalho, foram obtidas equações de regressão que relacionam C^0 e f_{cm} e estão apresentadas na figura 5.74. Nesta figura, os pontos em azul são os valores de C^0 calculados para o concreto de cada prisma ao substituir os valores das velocidades das ondas OL₁₁ na equação 3.140. Então, o valor encontrado para C^0 é $\lambda + 2G$. Os pontos em laranja são os valores de C^0 calculados para o concreto de cada prisma ao substituir os valores das velocidades das ondas OC₂₁ na equação 3.141. Neste caso, o valor

encontrado para C^0 é G . Os coeficientes de determinação (R^2) encontrados para as duas equações de regressão foi de 0.98, indicando um bom ajuste. Neste trabalho, os valores de C^0 foram calculados para 30 prismas (5 prismas para cada uma das 6 resistências). Seria interessante realizar este estudo abrangendo um número maior de resistências à compressão e também com um número maior de prismas para cada resistência. Assim, poderia se obter uma curva que pudesse ser utilizada para estimar o valor de C^0 por meio do f_{cm} para os elementos de concreto das estruturas *in situ*.

Figura 5.74 – Elemento do tensor constitutivo do material sem tensão (C^0) em função da resistência à compressão média do concreto (f_{cm}).



Fonte: Autor.

5.3.3 Determinação de uma equação empírica para obter a tensão a partir de $\Delta V/V_0$, f_{cm} ou E_{din}

Também foram determinadas equações que relacionaram os valores da tensão no concreto com os valores de $\Delta V/V_0$ e f_{cm} ou do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}). Então, para cada tipo de onda ultrassônica foram geradas equações para dois casos, apresentados a seguir.

Caso 3: É semelhante ao caso 1, no entanto, foi utilizado o termo $\Delta V/V_0$ ao invés de $(1+\Delta V/V_0)^2$. Portanto, foi encontrada uma equação de superfície em que as variáveis independentes foram $\Delta V/V_0$ e f_{cm} e a variável dependente foi σ/f_{cm} .

Caso 4: É semelhante ao caso 2. Apenas foi utilizado o termo $\Delta V/V_0$ no lugar de $(1+\Delta V/V_0)^2$. Então, a equação de superfície apresentou $\Delta V/V_0$ e E_{din} como variáveis independentes e σ como variável dependente.

As equações de superfície serão apresentadas apenas para as ondas OC₂₁ e OL₁₁, pois, foram as que apresentaram os melhores ajustes. O software utilizado para gerar as equações de superfície foi o LabFit.

5.3.3.1 Equações para as ondas OC₂₁

As equações de superfície obtidas para os casos 3 e 4 das ondas OC₂₁ foram as 5.11 e 5.12, respectivamente. Assim como feito anteriormente, foram geradas novas equações com os dados experimentais obtidos até o carregamento de $25\%f_{cm}$ com o objetivo de reduzir os erros obtidos no cálculo das tensões. Estas novas equações são as 5.13 e 5.14 para os casos 3 e 4, respectivamente.

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \left(0.0777 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / \left(1.3505 + 0.01956f_{cm} \right); R^2 = 0.85 \quad (5.11)$$

$$\sigma = \left(0.0404 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / \left(0.0990 - 0.1297 \times 10^{-5} E_{din} \right); R^2 = 0.90 \quad (5.12)$$

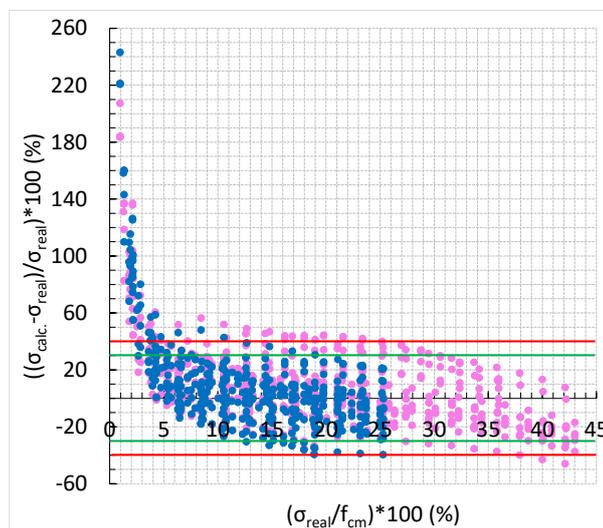
$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \left(0.0964 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / \left(1.9462 + 0.016f_{cm} \right); R^2 = 0.87 \quad (5.13)$$

$$\sigma = \left(0.0542 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / \left(0.1261 - 0.1772 \times 10^{-5} E_{din} \right); R^2 = 0.92 \quad (5.14)$$

A figura 5.75 apresenta o erro relativo que existiu no cálculo das tensões em função da porcentagem de tensão real aplicada (σ_{real}/f_{cm}) nos prismas para o caso 3. Os pontos em rosa e em azul representam os erros obtidos usando as equações 5.11 e 5.13, respectivamente. Assim como observado anteriormente, os erros relativos obtidos para porcentagens de tensão aplicada inferiores à $5\%f_{cm}$ são bastante elevados, mas, diminuem muito a partir deste valor de tensão aplicada. Observou-se que houve melhora nos erros ao utilizar a equação 5.13 no lugar da 5.11 para calcular as tensões quando as porcentagens de tensão reais aplicadas no concreto foram de

até $25\%f_{cm}$. Usando a equação 5.11, os erros variavam entre $+50\%$ e -35% entre $10\% f_{cm}$ e $25\%f_{cm}$. Com a equação 5.13, eles passaram variar em torno de $\pm 40\%$ neste intervalo de tensão.

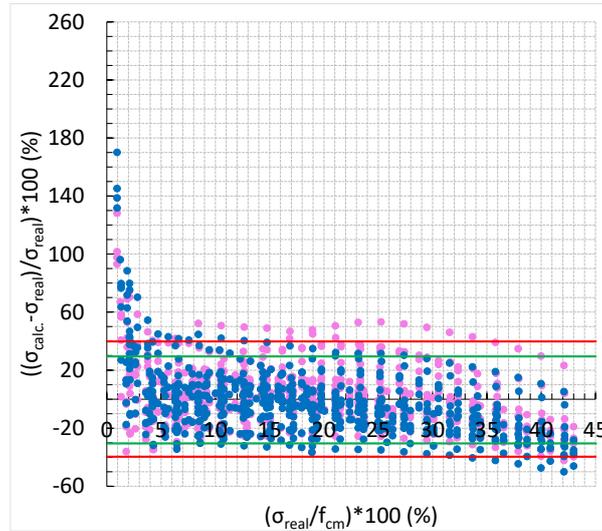
Figura 5.75 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar a equação 5.11, em rosa, e a equação 5.13, em azul, (caso 3 – OC₂₁).



Fonte: Autor.

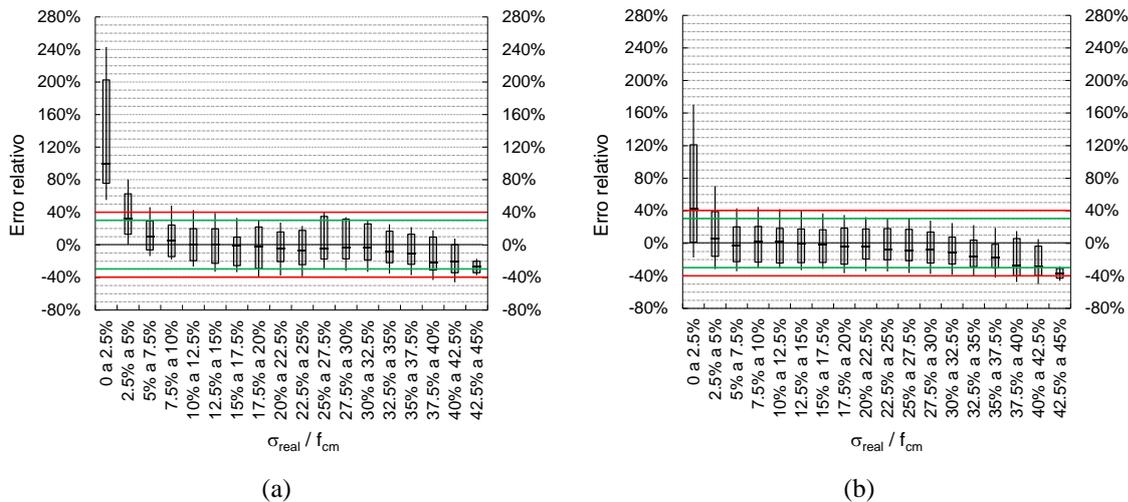
No caso 4, observou-se uma melhora nos erros ao utilizar a equação 5.14 para calcular as tensões ao longo de todo o carregamento dos prismas e não apenas até o carregamento correspondente à $25\%f_{cm}$. Portanto, neste caso, a equação 5.14 foi considerada mais adequada do que a equação 5.12 para o cálculo de todos os valores de tensão. Nos casos estudados anteriormente, se isto fosse feito, era observado uma piora na distribuição dos erros quando os carregamentos eram mais elevados, acima de $25\%f_{cm}$. Por isto, nestes casos, a nova equação gerada com os dados experimentais obtidos para os carregamentos de até $25\%f_{cm}$ não era utilizada para o cálculo das tensões além deste valor de carregamento aplicado. A figura 5.76 mostra os erros relativos no cálculo das tensões ao utilizar as equações 5.12 e 5.14 (caso 4). Observou-se que os erros obtidos para os casos 3 e 4 foram semelhantes, em torno de $\pm 40\%$ a partir da tensão real aplicada equivalente à $10\%f_{cm}$. Por meio das figuras 5.77a e 5.77b observou-se também que, a partir da tensão real aplicada equivalente à $5\%f_{cm}$, praticamente 80% das medidas apresentaram erros relativos dentro do intervalo de $\pm 30\%$. Apenas algumas medidas ficaram fora deste intervalo.

Figura 5.76 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real ao usar a equação 5.12, em rosa, e a equação 5.14, em azul, (caso 4 – OC₂₁).



Fonte: Autor.

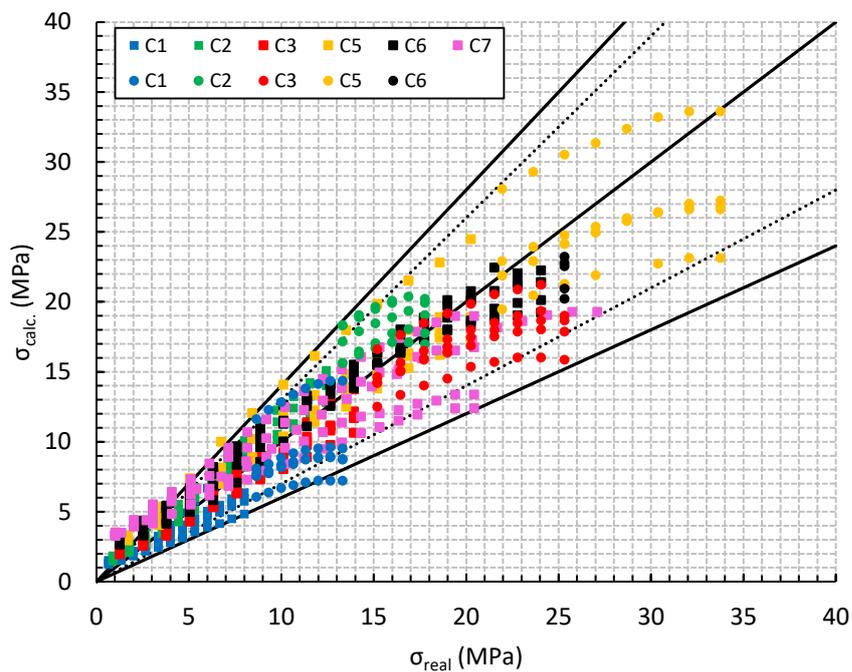
Figura 5.77 - Intervalos de erros relativos das medidas de tensão calculadas para cada intervalo de 2.5% de tensão real aplicada no concreto ao usar para o cálculo da tensão: (a) a equação 5.13 até 25% f_{cm} e a equação 5.11 acima de 25% f_{cm} (caso 3 – OC₂₁) e (b) a equação 5.14 ao longo de todo o carregamento (caso 4 – OC₂₁).



Fonte: Autor.

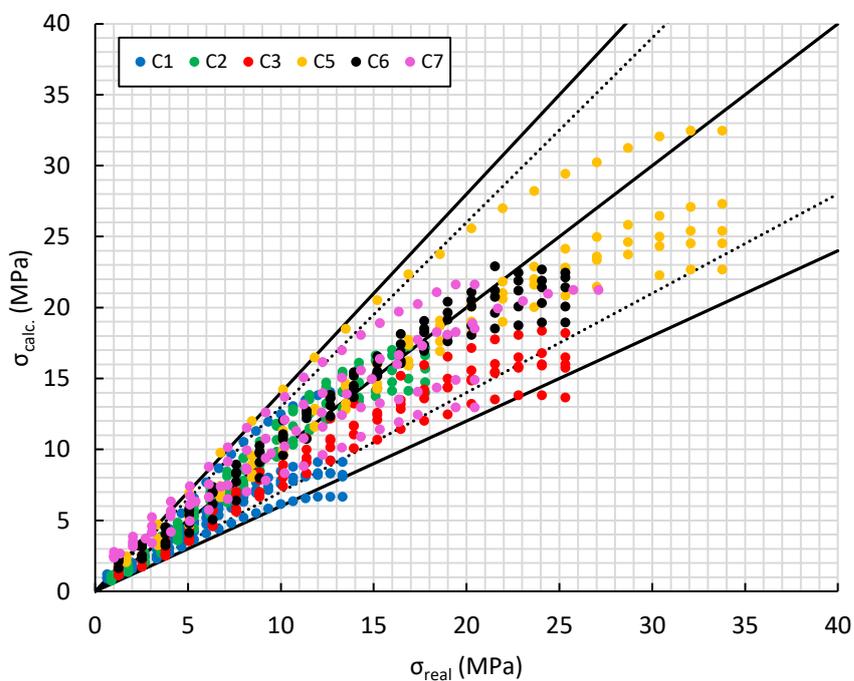
As figuras 5.78 e 5.79, apresentam as tensões calculadas em função das tensões reais para os casos 3 e 4, respectivamente, das ondas OC₂₁. Na figura 5.78, os marcadores quadrangulares e circulares indicam as tensões calculadas ao usar as equações 5.13 e 5.11, respectivamente, para o caso 3. Na figura 5.79, tem-se só um tipo de marcador (circular), já que as tensões foram calculadas usando apenas uma equação (equação 5.14). Por meio destas figuras, observou-se que os erros no cálculo da tensão ficaram dentro do intervalo de $\pm 40\%$ para praticamente todos os valores de tensão calculadas quando a tensão aplicada foi superior à 5 MPa.

Figura 5.78 – Tensão calculada (σ_{calc}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 3 (OC₂₁) ao usar as equações 5.13 e 5.11 quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} e maiores que 25% f_{cm} , respectivamente.



Fonte: Autor.

Figura 5.79 – Tensão calculada (σ_{calc}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 4 (OC₂₁) ao usar a equação 5.14 ao longo de todo o carregamento.



Fonte: Autor.

5.3.3.2 Equações para as ondas OL₁₁

As equações de superfície determinadas para os casos 3 e 4 usando os dados experimentais obtidos ao longo de todo o carregamento dos prismas foram as 5.15 e 5.16. Também foram geradas equações usando apenas os dados experimentais obtidos para o carregamento de até 25% f_{cm} (equações 5.17 e 5.18, para os casos 3 e 4, respectivamente). Ao usar estas equações, ao invés das 5.15 e 5.16, para calcular as tensões quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} , os erros melhoraram significativamente, conforme mostram as figuras 5.80 e 5.81 para os casos 3 e 4, respectivamente.

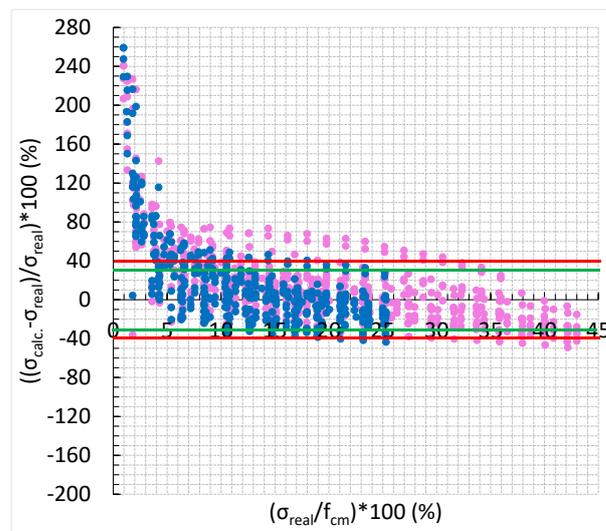
$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \left(0.2240 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / \left(3.7334 + 0.4492 \times 10^{-3} f_{cm}^2 \right); R^2=0.78 \quad (5.15)$$

$$\sigma = \left(0.0998 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / \left(0.1481 - 0.1389 \times 10^{-5} E_{din} \right); R^2=0.80 \quad (5.16)$$

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \left(0.2810 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / \left(4.8781 + 0.4551 \times 10^{-3} f_{cm}^2 \right); R^2=0.81 \quad (5.17)$$

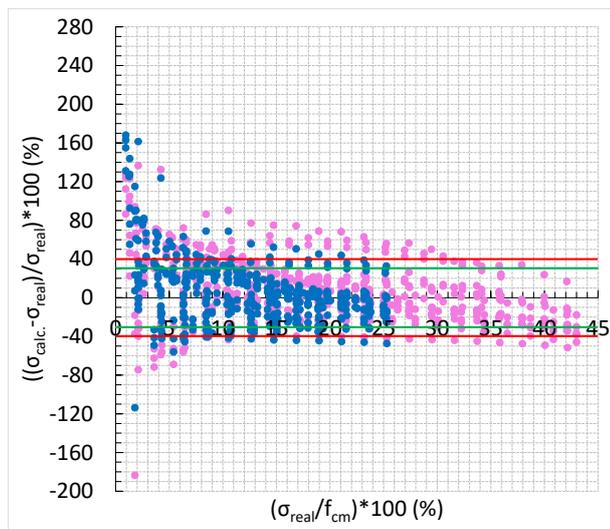
$$\sigma = \left(0.1548 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / \left(0.1948 - 0.2065 \times 10^{-5} E_{din} \right); R^2=0.88 \quad (5.18)$$

Figura 5.80 – Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real ao usar a equação 5.15, em rosa, e a equação 5.17, em azul, (caso 3 – OL₁₁).



Fonte: Autor.

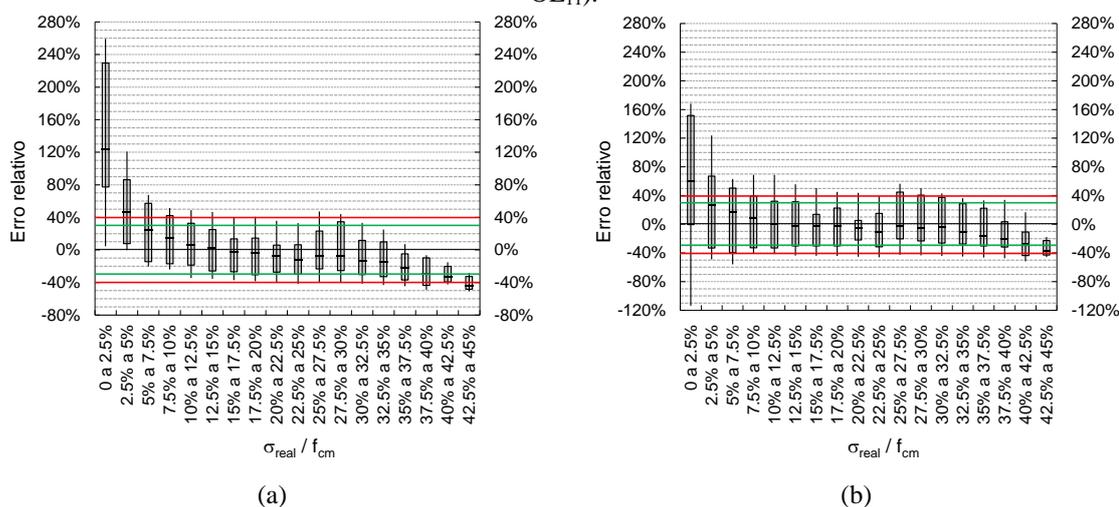
Figura 5.81 – Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real ao usar a equação 5.16, em rosa, e a equação 5.18, em azul, (caso 4 – OL₁₁).



Fonte: Autor.

As figuras 5.80 e 5.82a mostram que os erros obtidos no caso 3 foram menores do que os obtidos para o caso 4 (figuras 5.81 e 5.82b). Observou-se que o intervalo de erro obtido para 80% das medidas foi bem menor para o caso 3.

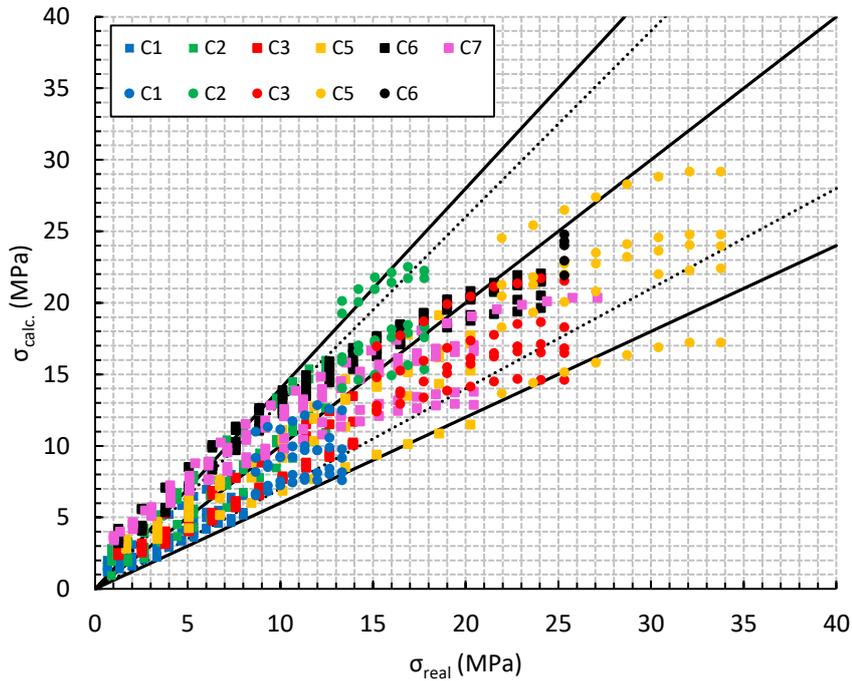
Figura 5.82 - Intervalos de erros relativos das medidas de tensão calculadas para cada intervalo de 2.5% de tensão real aplicada no concreto ao usar para o cálculo da tensão: (a) a equação 5.17 até 25% f_{cm} e a equação 5.15 acima de 25% f_{cm} (caso 3 – OL₁₁) e (b) a equação 5.18 até 25% f_{cm} e a equação 5.16 acima de 25% f_{cm} (caso 4 – OL₁₁).



Fonte: Autor.

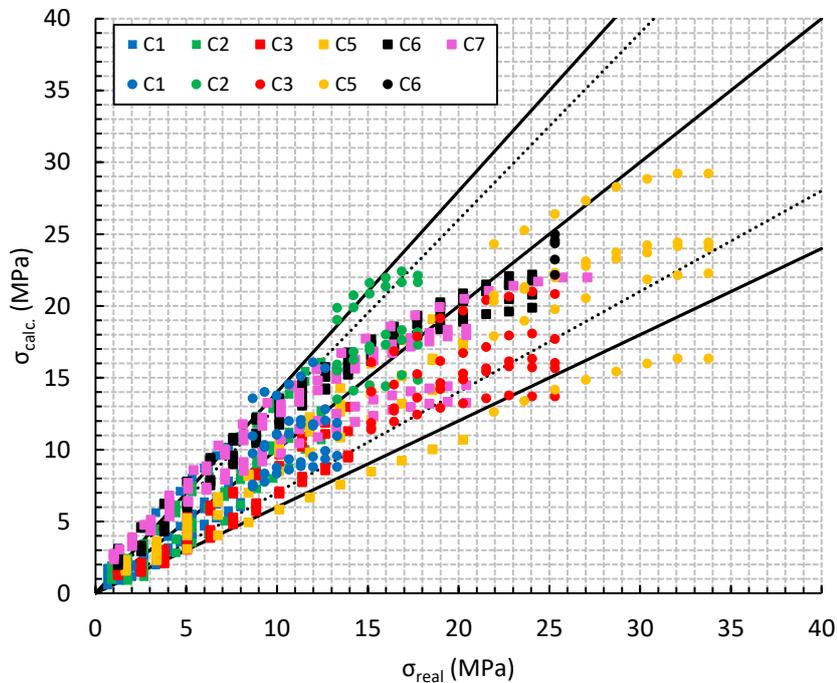
As figuras 5.83 e 5.84 mostram as tensões calculadas em função das tensões reais para os casos 3 e 4, respectivamente, das ondas OL₁₁. Os marcadores quadrangulares e circulares indicam as tensões calculadas ao usar as equações 5.17 e 5.15, respectivamente, para o caso 3 e ao usar as equações 5.18 e 5.16, respectivamente, para o caso 4.

Figura 5.83 – Tensão calculada (σ_{calc}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 3 (OL₁₁) ao usar as equações 5.17 e 5.15 quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} e maiores que 25% f_{cm} , respectivamente.



Fonte: Autor.

Figura 5.84 – Tensão calculada (σ_{calc}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 4 (OL₁₁) ao usar as equações 5.18 e 5.16 quando as tensões reais aplicadas foram de até 25% f_{cm} e maiores que 25% f_{cm} , respectivamente.



Fonte: Autor.

Observou-se que os erros encontrados no cálculo das tensões foram maiores quando foram usadas as equações dos casos 3 e 4 referentes às ondas OL₁₁ (figuras 5.83 e 5.84) do que

quando foram usadas as equações destes mesmos casos referentes às ondas OC₂₁ (figuras 5.78 e 5.79). Isto também é verificado ao comparar as figuras 5.80 e 5.81 com as figuras 5.75 e 5.76. Portanto, em ambos os estudos realizados, usando $(1+\Delta V/V_0)^2$ ou $\Delta V/V_0$, concluiu-se que as equações para as ondas OC₂₁ foram as que resultaram em menores erros nos cálculos das tensões. Mesmo assim, verificou-se que para todos os casos estudados com ambos os tipos de ondas a maioria dos valores de tensão calculados apresentaram erros dentro do intervalo de $\pm 40\%$.

Erros em torno de 40% parecem grandes. No entanto, se imaginarmos que nada se sabe sobre o estado de tensão numa estrutura de concreto que se quer avaliar, obter um valor de tensão mesmo que com um erro desta ordem de grandeza já fornece uma ideia do estado em que se encontra o elemento estrutural. É uma informação que pode auxiliar numa tomada decisão.

5.4 Estudo do efeito acustoelástico em prismas de concreto de diferentes traços usando o método de transmissão indireta

Os resultados dos ensaios realizados pelos métodos de transmissão direta e indireta (Dir+Ind) e também pelo método de transmissão indireta apenas (Ind) nos prismas de diferentes traços são discutidos. Também são apresentadas equações empíricas para a avaliação de tensões no concreto por meio dos ensaios com as medidas indiretas. Estas equações relacionam a variação relativa de velocidade e o tensor constitutivo com o nível de tensão aplicada no concreto a partir de dados conhecidos de f_{cm} ou do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}).

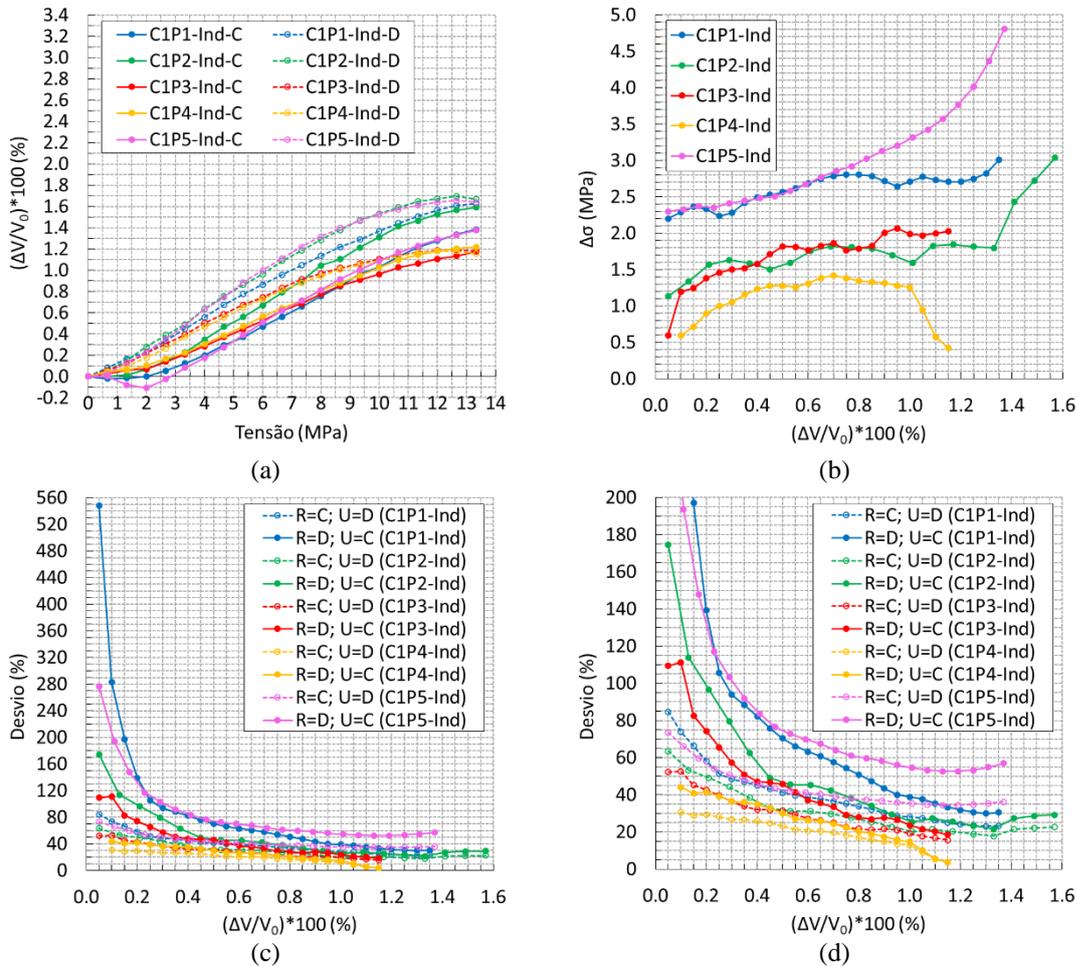
5.4.1 Análise dos ensaios realizados usando os métodos de transmissão direta e indireta (Dir+Ind)

Comparação entre as curvas acustoelásticas obtidas pelo método de transmissão indireta nas fases de carregamento e descarregamento

As curvas da variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto, OL_{1ind}, em função da tensão para as fases de carregamento e descarregamento dos cinco prismas do concreto C1 estão apresentadas na figura 5.85a. Para cada prisma, o sinal usado como referência para gerar a curva da fase de carregamento foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão imediatamente antes de iniciar o carregamento do mesmo e o sinal de referência

usado na geração das curvas da fase de descarregamento foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão imediatamente após o término do seu descarregamento.

Figura 5.85- Gráficos para as ondas OL_{11ind} : (a) Curvas acustoelásticas estabilizadas do ciclo 12 para as fases de carregamento e descarregamento; (b) Diferença entre as tensões ($\Delta\sigma$) obtidas das curvas de carregamento e descarregamento para um mesmo valor de $\Delta V/V_0$; (c) Desvio em porcentagem do $\Delta\sigma$ em relação à tensão real atuante no prisma.



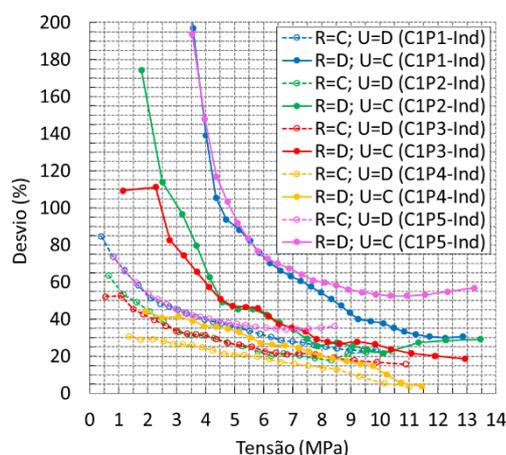
Fonte: Autor.

Assim como foi observado no estudo com o método da transmissão direta, as curvas para a fase de descarregamento apresentaram maiores variações relativas de velocidade para um mesmo valor de tensão aplicada no prisma do que as curvas para a fase de carregamento. Ou seja, no descarregamento, o efeito acustoelástico foi maior. Portanto, ao emitir as ondas ultrassônicas no elemento de concreto, as variações relativas de velocidade estarão relacionadas com diferentes valores de tensão a depender da fase em que este elemento se encontra. Para um mesmo $\Delta V/V_0$, as tensões obtidas por meio da curva de descarregamento serão menores. Na figura 5.85a, a diferença entre os valores de tensão ($\Delta\sigma$) fornecidos por ambas as curvas para um mesmo valor $\Delta V/V_0$, é apresentada na figura 5.85b. Os gráficos da figura 5.85c foram

gerados a partir da suposição de duas situações. Em ambas, não se conhece a fase em que um elemento de concreto se encontra (carregamento ou descarregamento). Então, na primeira situação, a curva utilizada (U) para obter a tensão por meio de $\Delta V/V_0$ é a da fase de descarregamento (D). No entanto, o elemento está na fase de carregamento (C), então, a curva real (R) é desta fase. Deste modo irão ocorrer os desvios $\Delta\sigma$ em relação à tensão real. Estes desvios foram apresentados por meio das curvas “R=C; U=D” na figura 5.85c. Na outra situação, a curva utilizada (U) é a da fase de carregamento (C), porém, o elemento se encontra fase de descarregamento (D), ou seja, a curva real (R) é esta última. Os desvios obtidos para este caso foram apresentados pelas curvas denominadas “R=D; U=C” na figura 5.85c.

A figura 5.85d mostra a figura 5.85c apenas com uma escala diferente no eixo y que permite melhor visualizar os valores dos desvios. Assim como no caso do método direto, houve redução dos desvios com o aumento de $\Delta V/V_0$, ou seja, com o aumento da tensão aplicada no prisma. A figura 5.86 mostra o desvio em função da tensão estimada, obtida por meio da curva utilizada. Como o efeito acustoelástico das curvas de descarregamento são maiores e estas curvas fornecem os menores desvios no cálculo das tensões quando não se sabe a fase em que o elemento estudado se encontra, elas se mostram mais favoráveis para serem usadas na avaliação de tensões do que as curvas do carregamento. Portanto, este estudo com o método indireto confirma o que foi verificado no estudo com o método direto. Então, nos estudos seguintes com o método de transmissão indireta, as análises foram realizadas somente para a fase de descarregamento dos prismas.

Figura 5.86-Desvio em porcentagem em função da tensão estimada no prisma para as ondas OL_{11ind} .

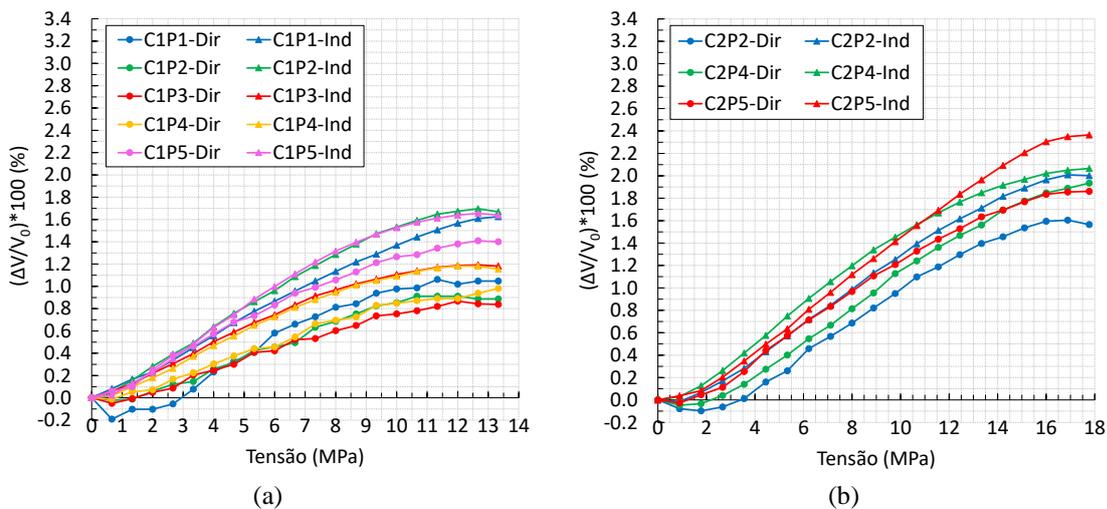


Fonte: Autor.

Comparação entre as curvas acustoelásticas obtidas pelo métodos de transmissão direta e indireta

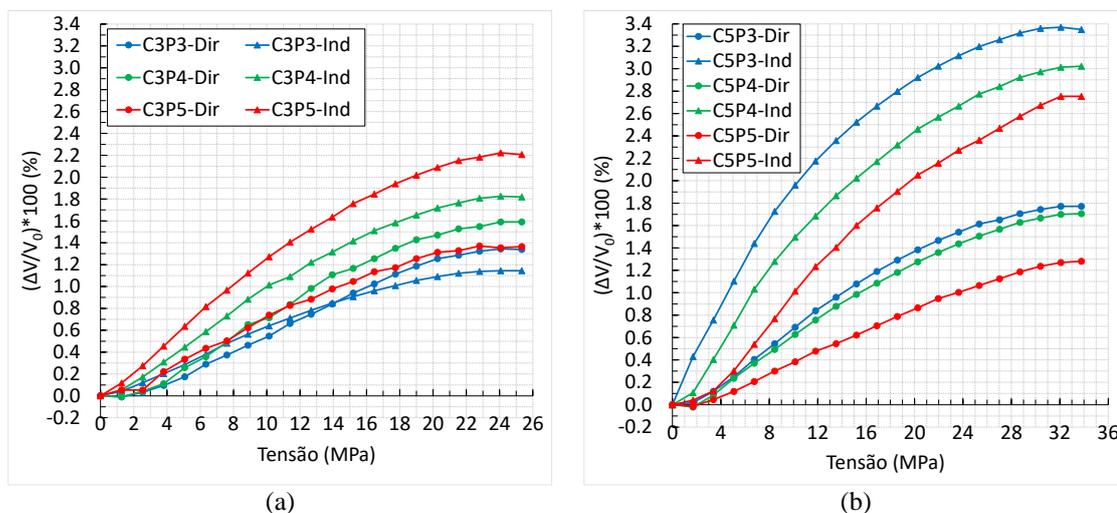
As figuras 5.87 à 5.89 apresentam os gráficos da variação relativa de velocidade ($\Delta V/V_0$) em função da tensão obtidos por ambos os métodos de transmissão, direta e indireta, para cada prisma. Estes gráficos foram gerados para a fase de descarregamento do ensaio de cada prisma e o sinal usado como referência para a geração das curvas foi o das ondas emitidas nos prismas sem tensão imediatamente após o descarregamento dos mesmos. As curvas referentes ao método de transmissão direta são aquelas com marcadores circulares e foram denominadas “CXPY – Dir”, onde X e Y referem-se ao tipo de concreto e ao número do prisma analisado. As curvas das medidas indiretas possuem marcadores triangulares e estão denominadas como “CXPY – Ind”.

Figura 5.87 – Curvas da variação relativa da velocidade em função da tensão obtidas pelos métodos de transmissão direta e indireta para os prismas do concreto (a) C1 e (b) C2.



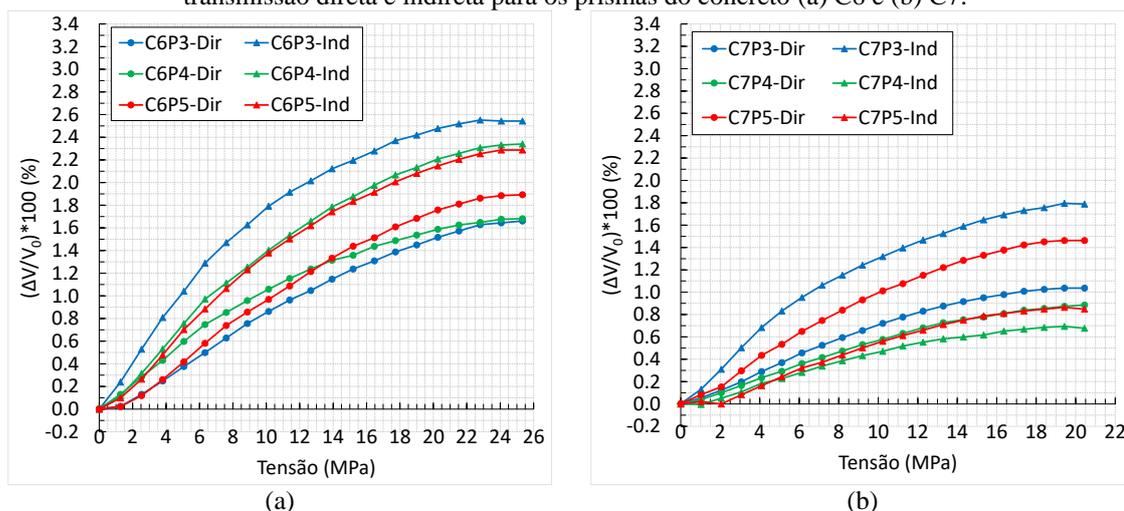
Fonte: Autor.

Figura 5.88 - Curvas da variação relativa da velocidade em função da tensão obtidas pelos métodos de transmissão direta e indireta para os prismas do concreto (a) C3 e (b) C5.



Fonte: Autor.

Figura 5.89 - Curvas da variação relativa da velocidade em função da tensão obtidas pelos métodos de transmissão direta e indireta para os prismas do concreto (a) C6 e (b) C7.



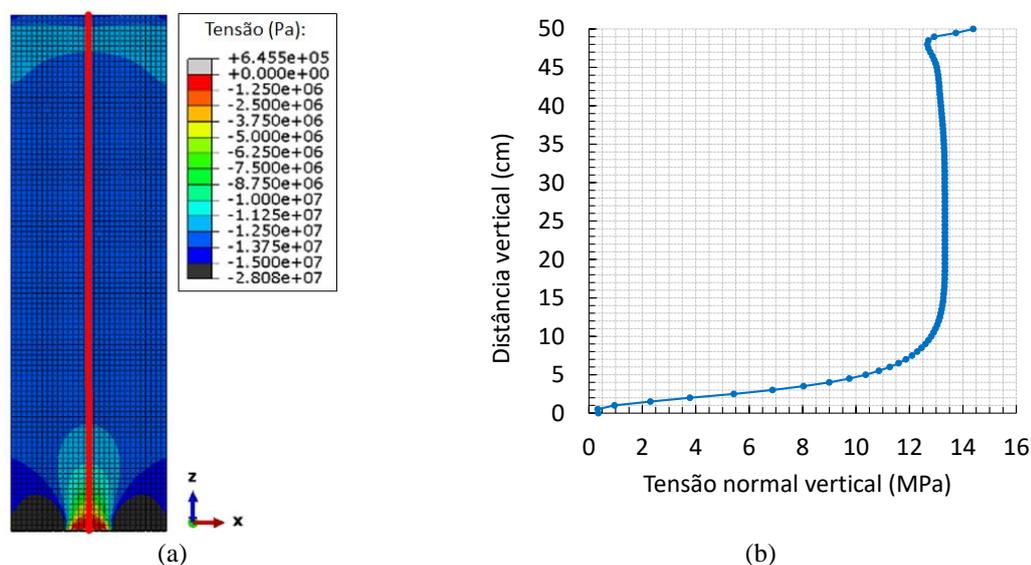
Fonte: Autor.

Observou-se que o efeito acustoelástico apresentado pelas ondas emitidas pelo método de transmissão indireta foi maior do que o efeito apresentado pelas ondas emitidas pelo método de transmissão direta. Apenas as curvas dos prismas P4 e P5 do concreto C7 mostraram o contrário, com o efeito acustoelástico maior no caso das ondas emitidas pelo método direto (figura 5.89b). A diferença entre as variações relativas de velocidade para valores iguais de tensão aplicada obtida pelos dois métodos ficou bem evidente. Os prismas que apresentaram as maiores diferenças foram os prismas do concreto C5. Neste caso, os valores de $\Delta V/V_0$ obtidos pelo método direto no último incremento de carga foi de 1.77%, 1.71% e 1.28% para os prismas P3, P4 e P5, respectivamente. Em contrapartida, os valores de $\Delta V/V_0$ obtidos pelo método

indireto no último incremento de carga para estes mesmos prismas foram de 3.35%, 3.02% e 2.75%, respectivamente. Ou seja, no último incremento de carga, houve um aumento em torno de 2 vezes no valor da variação relativa de velocidade ao emitir as ondas pelo método de transmissão indireta. Mesmo que esta relação entre os valores de $\Delta V/V_0$ pelo método indireto e os valores de $\Delta V/V_0$ pelo método direto tenha sido menor para os outros prismas, ela ainda foi bem evidente. No contexto da aplicação do ensaio de ultrassom para a avaliação de tensões em estruturas de concreto, é vantajoso ter efeitos acustoelásticos elevados. Quanto maior for este efeito, melhor é para a realização da avaliação, pois, se torna mais fácil a identificação da variação de velocidade causada pela tensão.

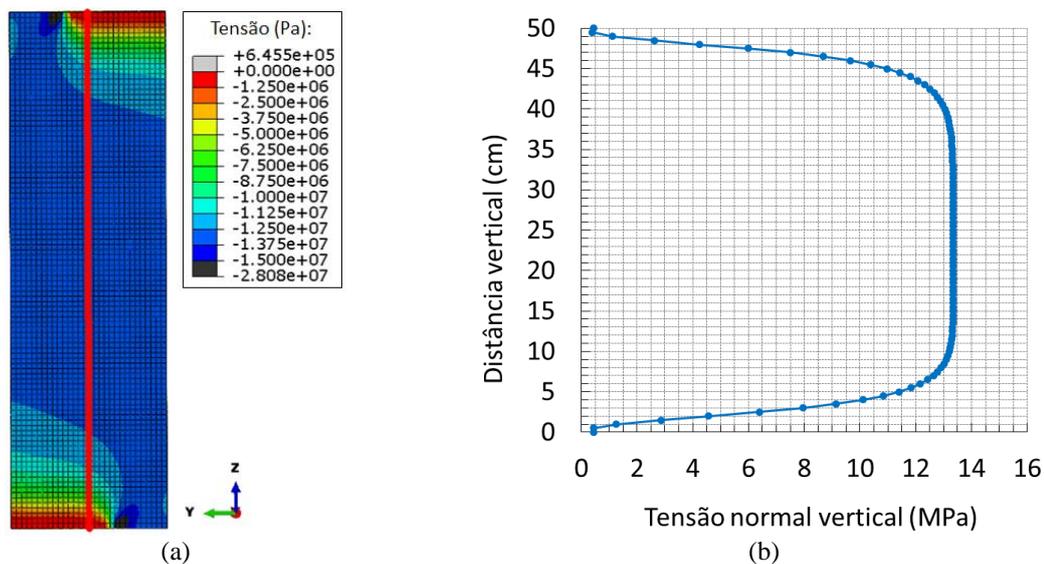
Os transdutores foram posicionados em locais diferentes do prisma para emitir as ondas pelo método de transmissão direta e indireta. No primeiro caso, os transdutores foram posicionados no centro das faces de extremidade e, no segundo caso, na face lateral (figura 4.19). Como as peças de aço em U precisaram ser colocadas acima e abaixo do prisma, a distribuição de tensões no caminho de propagação das ondas ultrassônicas emitidas por cada método foi diferente. Para um mesmo valor de carregamento aplicado no prisma, a tensão média gerada no material foi maior ao longo da face do prisma do que ao longo do centro do mesmo. Então, as ondas emitidas pelo método de transmissão indireta percorreram um material com um valor de tensão média maior do que as ondas emitidas pelo método de transmissão direta. Por meio da simulação numérica (ver apêndice A) foi possível observar a distribuição de tensões na face do prisma na qual os transdutores foram posicionados pelo método indireto e a distribuição de tensões no centro do prisma, onde as ondas se propagaram pelo método direto (figuras 5.90a e 5.91a). As figuras 5.90a e 5.91a mostram a distribuição de tensões normais verticais na face e no centro, respectivamente, do prisma C1P1 quando foi aplicado o carregamento máximo neste prisma. As linhas vermelhas foram desenhadas para indicar o percurso das ondas. As figuras 5.90b e 5.91b apresentam as tensões normais verticais ao longo da linha vermelha das figuras 5.90a e 5.91a, respectivamente. No eixo y, é apresentada a posição ao longo desta linha e, no eixo x, a tensão de compressão correspondente. Estas são as distribuições de tensões obtidas no caminho de percurso das ondas emitidas pelos métodos de transmissão direta e indireta quando o valor máximo de carregamento foi aplicado no prisma C1P1.

Figura 5.90 –Face lateral onde os transdutores foram posicionados pelo arranjo de transmissão indireta: (a) Distribuição das tensões normais e (b) Tensões normais verticais de compressão ao longo da linha vermelha quando a carga máxima (300 kN) foi aplicada no prisma C1P1.



Fonte: Autor.

Figura 5.91 - Face central: (a) Distribuição das tensões normais e (b) Tensões normais verticais de compressão ao longo da linha vermelha quando a carga máxima (300 kN) foi aplicada no prisma C1P1.

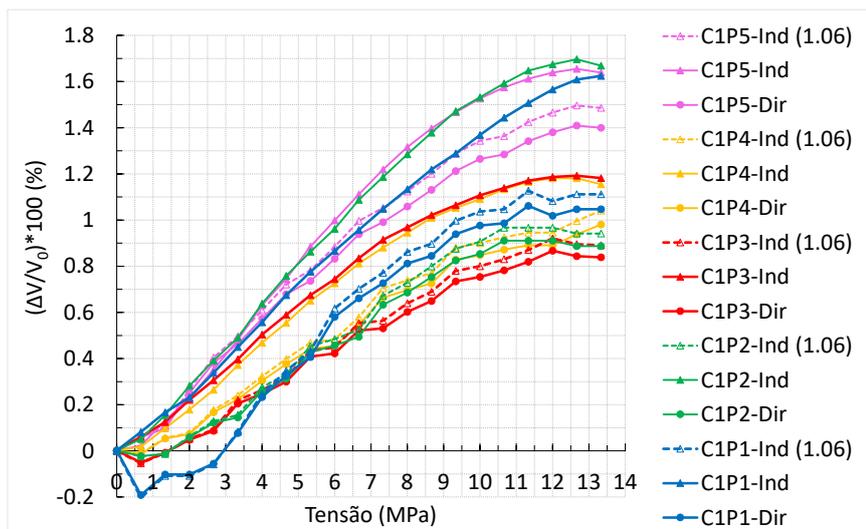


Fonte: Autor.

A tensão média no caminho de propagação das ondas emitidas pelos métodos de transmissão direta e indireta foi determinada pelo cálculo da média das tensões distribuídas ao longo deste caminho obtidas pela simulação numérica. Ou seja, pela média das tensões apresentadas nos gráficos como os das figuras 5.90b e 5.91b. Ao gerar estes gráficos para cada incremento de carga aplicado nos diferentes prismas, foi calculada a tensão média resultante das distribuições das tensões para cada incremento. Para um mesmo valor de carregamento

aplicado num prisma, a razão entre a tensão média ao longo da face e ao longo do centro do prisma foi de 1.06. De acordo com a equação 2.58, a tensão (σ) e a variação relativa de velocidade ($\Delta V/V_0$) são grandezas diretamente proporcionais. Deste modo, para um mesmo concreto, isto é, para um mesmo A_{ij} , ao multiplicar o valor de σ por 1.06, $\Delta V/V_0$ também será multiplicado por 1.06. Portanto, o aumento no valor da tensão em 1.06 vezes no caminho de propagação das ondas emitidas pelo método indireto gera um aumento na variação relativa de velocidade de 1.06 vezes. No entanto, o aumento observado em $\Delta V/V_0$ quando as ondas foram emitidas pelo método indireto foi muito maior do que isto. A figura 5.92 mostra os gráficos de variação relativa de velocidade em função da tensão obtidos para os prismas do concreto C1. As curvas com marcadores circulares e triangulares cheios são referentes aos métodos de transmissão direta e indireta, respectivamente, obtidas experimentalmente. São as mesmas curvas apresentadas na figura 5.87a. As curvas tracejadas com marcadores triangulares vazados mostram como seria a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto considerando o aumento de 1.06 vezes no valor da tensão atuante no caminho de propagação destas ondas. Portanto, estas curvas foram obtidas ao multiplicar o valor de $\Delta V/V_0$ da curva referente ao método direto (com marcadores circulares cheios) por 1.06. Na legenda da figura 5.92, estas curvas foram denominadas C1PX – Ind (1.06), onde X indica o número do prisma.

Figura 5.92 – Curvas de $\Delta V/V_0$ em função da tensão para os prismas do concreto C1 obtidas experimentalmente pelos métodos direto e indireto e curvas de $\Delta V/V_0$ para o método indireto obtidas ao multiplicar por 1.06 os valores de $\Delta V/V_0$ da curva experimental do método direto.

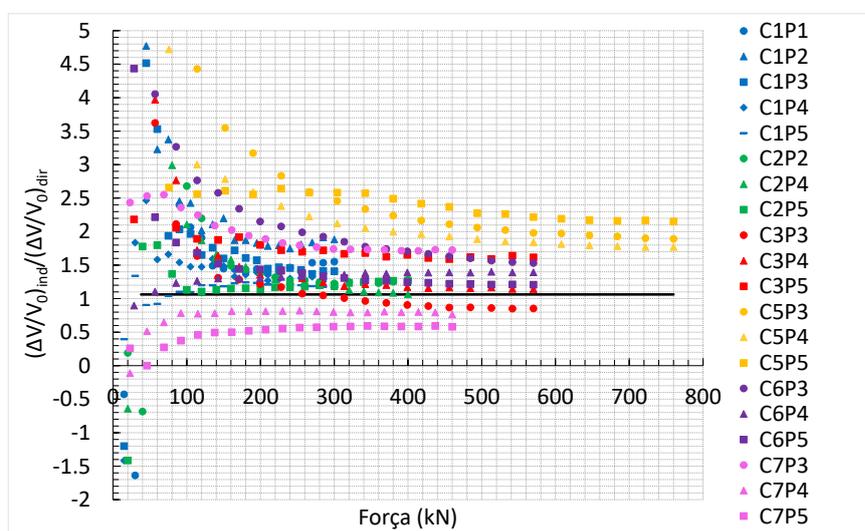


Fonte: Autor.

Por meio da figura 5.92, ficou claro que o aumento em $\Delta V/V_0$ das ondas emitidas pelo método indireto foi bem maior do que 1.06 vezes. Ou seja, o valor maior encontrado para

$\Delta V/V_0$ das ondas emitidas pelo método indireto não foi causado apenas por causa do maior valor de tensão existente no caminho de propagação destas ondas. Isto foi verificado para todos os prismas. A figura 5.93 mostra a razão entre a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto e a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método direto ($(\Delta V/V_0)_{ind}/(\Delta V/V_0)_{dir}$) em função do carregamento aplicado nos prismas. A linha horizontal em preto nesta figura indica a razão de 1.06, que, como foi visto, é o aumento no valor de $\Delta V/V_0$ correspondente ao aumento existente no valor da tensão média entre os diferentes caminhos de propagação, direto e indireto.

Figura 5.93 – Razão entre a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto e a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método direto em função do carregamento aplicado nos prismas.



Fonte: Autor.

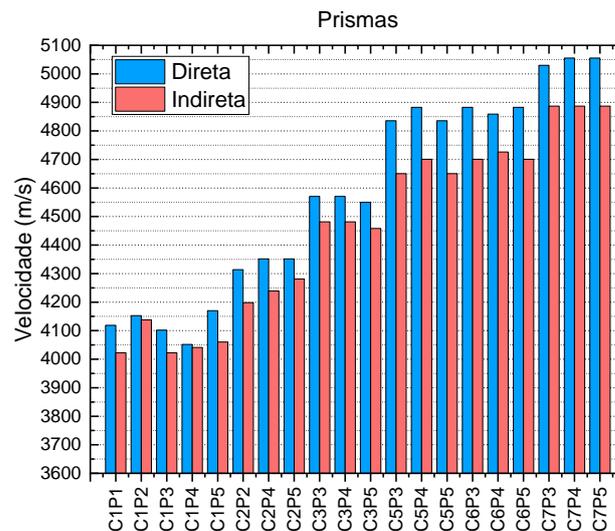
Observou-se que a razão $(\Delta V/V_0)_{ind}/(\Delta V/V_0)_{dir}$ geralmente foi maior do que 1.06 para todos os prismas, com exceção dos prismas P4 e P5 do concreto C7, que apresentaram valores inferiores à 1.06. Então, ficou comprovado que não foi o maior valor de tensão média existente no caminho de propagação das ondas emitidas pelo método indireto que fez com que a variação relativa de velocidade destas ondas fosse tão maior do que a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método direto. As ondas OL_{11} emitidas pelo método indireto (OL_{11ind}) apresentaram maior sensibilidade à tensão do que as ondas OL_{11} emitidas pelo método direto (OL_{11dir}). Portanto, o efeito acustoelástico é influenciado pelo método de transmissão das ondas ultrassônicas. Este efeito é maior ao utilizar o método indireto ao invés do direto.

Sobre os gráficos das figuras 5.87 à 5.89, também foi observado que a não linearidade inicial presente nas curvas acustoelásticas é menor no caso das curvas referentes ao método de transmissão indireta. Para os prismas do concreto C1 e C2, por exemplo, chegaram a ocorrer

valores negativos de variação relativa de velocidade por causa da não linearidade no início das curvas referentes ao método direto, o que não foi observado no caso das curvas referentes ao método indireto. Não foram observados valores negativos de variação relativa de velocidade nas curvas do método indireto para todos os prismas. Este fato é favorável à análise de tensões por meio do ultrassom.

A respeito dos valores das velocidades das ondas ao se propagarem no prisma pelos métodos de transmissão direta e indireta, foi observado que eles foram um pouco maiores quando as ondas se propagaram pelo método direto. A figura 5.94 mostra as velocidades das ondas emitidas pelos métodos direto e indireto em cada prisma antes de eles serem ensaiados, ou seja nos prismas sem tensão. A qualidade do concreto do prisma é maior no interior do elemento do que na superfície, já que a superfície apresenta maior porosidade por causa de bolhas de ar que se formam durante a vibração do concreto e acabam ficando aprisionadas entre a forma e o concreto fresco. Além disto, podem existir fissuras nas superfícies causadas pela retração do material durante a secagem. A proporção entre agregados e argamassa também pode ser menor na superfície do concreto. A quantidade de vazios e de agregados influencia as velocidades das ondas. Quanto maior for a quantidade de vazios e menor for a quantidade de agregados no concreto, menor será a velocidade das ondas ao se propagarem por ele. Portanto, é natural que os valores de velocidades tenham sido menores quando as ondas se propagaram na superfície dos prismas, o que ocorreu quando elas foram emitidas pelo método indireto.

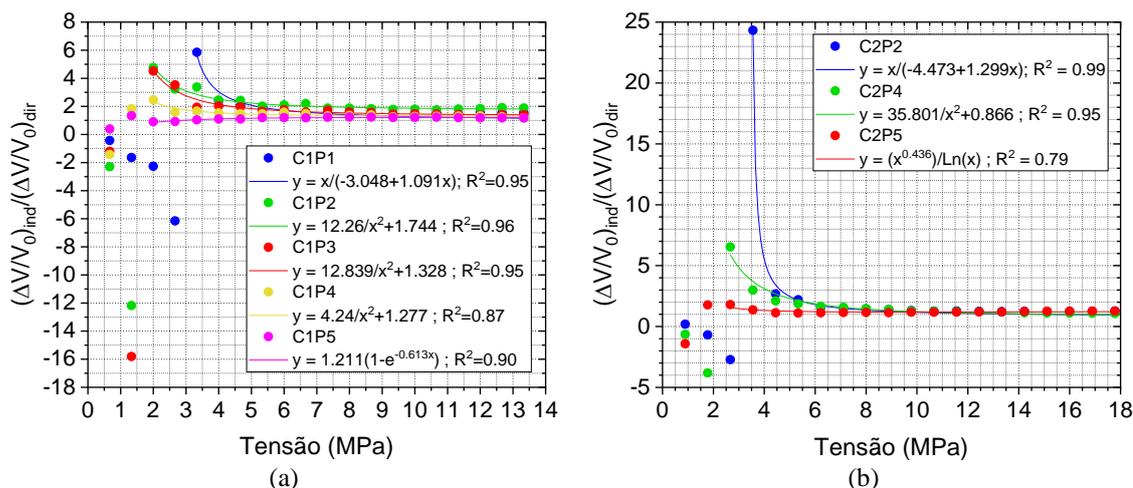
Figura 5.94 – Velocidade das ondas ultrassônicas ao se propagarem nos prismas sem tensão pelo método de transmissão direta e indireta.



Fonte: Autor.

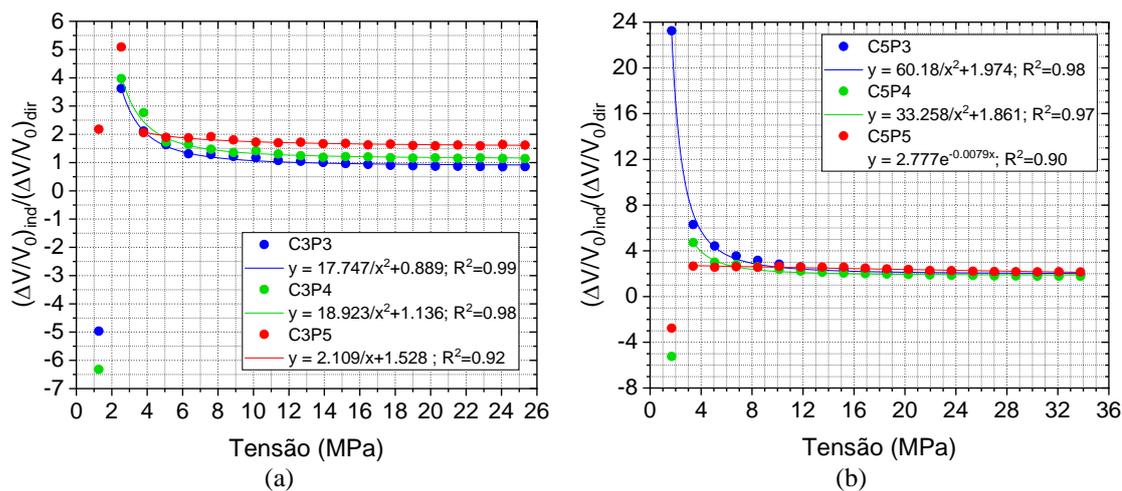
As figuras 5.95 a 5.97, referentes aos concretos C1 ao C3 e C5 ao C7, mostram a razão entre a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto e a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método direto, $(\Delta V/V_0)_{ind}/(\Delta V/V_0)_{dir}$, em função da tensão aplicada nos prismas.

Figura 5.95– Razão entre a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto e a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método direto em função da tensão para os prismas do concreto (a) C1 e (b) C2.



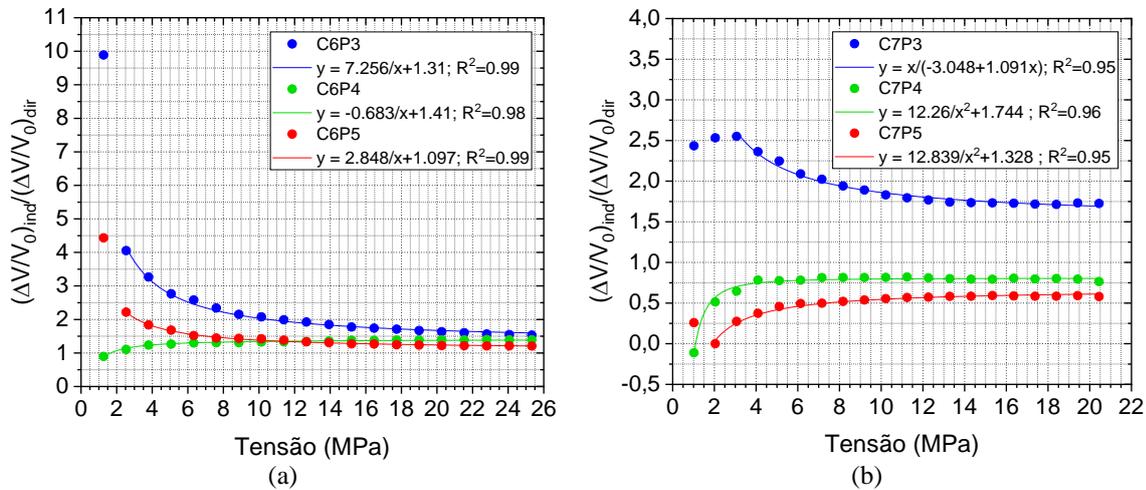
Fonte: Autor.

Figura 5.96– Razão entre a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto e a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método direto em função da tensão para os prismas do concreto (a) C3 e (b) C5.



Fonte: Autor.

Figura 5.97– Razão entre a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto e a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método direto em função da tensão para os prismas do concreto (a) C6 e (b) C7.



Fonte: Autor.

Os pontos dos gráficos das figuras 5.95 a 5.97 com valores de ordenada positivos ou negativos bastante elevados em comparação aos demais pontos foram gerados pela relação entre dois valores de variação relativa de velocidade onde um deles foi muito próximo de zero. Este valor foi o correspondente à medida de variação relativa de velocidade obtida pelo método direto. Quando existiram trechos não lineares com valores negativos de variação relativa de velocidade no início das curvas acustoelásticas do método direto, ocorreram valores de variação relativa de velocidade muito próximos de zero quando estas curvas cruzaram os eixos das abscissas (figuras 5.87, 5.88 e 5.89b). Ao dividir o valor de $\Delta V/V_0$ correspondente, contido na curva do método indireto, por este valor muito próximo de zero, o valor resultante foi bastante elevado em comparação aos demais valores do gráfico também obtidos por esta relação. Isto ocorreu com os prismas P1 ao P4 do concreto C1 (ver figuras 5.87a e 5.95a), P2, P4 e P5 do concreto C2 (ver figuras 5.87b e 5.95b), P3 e P4 do concreto C3 (ver figuras 5.88a e 5.96a), P4 e P5 do concreto C5 (ver figuras 5.88b e 5.96b). Mesmo quando as curvas acustoelásticas obtidas com o método direto não apresentaram o trecho não linear inicial com valores de variação relativa de velocidade negativos, também existiram pontos com valores de variação relativa de velocidade muito próximos de zero. Conseqüentemente, nestes casos, também ocorreram pontos com valores de ordenada bastante elevados nos gráficos da razão entre as variações relativas de velocidades dos métodos indiretos e diretos em função da tensão. Isto aconteceu com os prismas P5 do concreto C3 (ver figuras 5.88a e 5.96a), P3 do concreto C5 (ver figuras 5.88b e 5.96b), P3 e P5 do concreto C6 (ver figuras 5.89a e 5.97a).

Observou-se nos gráficos das figuras 5.95 a 5.97 que, em geral, existiu um valor de tensão aplicada nos prismas a partir do qual a razão entre as variações relativas de velocidade dos métodos indireto e direto começou a diminuir. Esta redução ocorreu continuamente com o acréscimo de tensão no prisma até que o valor desta razão se tornou praticamente constante. Consequentemente, houve a formação de um patamar no gráfico das figuras 5.95 a 5.97. O valor de tensão a partir do qual começou a ocorrer a diminuição da razão entre as variações relativas de velocidade ocorreu no início do carregamento. Este comportamento só foi diferente para os prismas P4 do concreto C6 e P4 e P5 do concreto C7. Nestes casos, ocorreu aumento da razão entre as variações relativas de velocidade com a aplicação da tensão nos prismas até um certo valor de tensão, a partir do qual, o valor desta razão se tornou praticamente constante (figuras 5.97a e 5.97b). Em qualquer um dos casos, a tendência de comportamento dos valores resultantes da razão entre as variações relativas de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto e direto foi a mesma: atingir um valor constante, caracterizado pela formação de um patamar no gráfico. Neste trabalho, o valor máximo desta razão ao atingir este patamar foi em torno de 2.2, referente ao prisma P5 do concreto C5 (figura 5.93). Ou seja, a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método indireto foi 2.2 vezes maior do que a variação relativa de velocidade das ondas emitidas pelo método direto ao atingir este patamar. O valor mínimo desta razão no patamar foi em torno de 0.6, referente ao prisma P5 do concreto C7 (figura 5.93).

A fim de representar o comportamento da razão entre as variações relativas de velocidade das ondas pelos métodos indireto e direto em função da tensão no concreto por meio de equações, foram realizadas regressões nos gráficos das figuras 5.95 a 5.97. Estas equações estão apresentadas nas legendas destas figuras. Para gerar a equação a partir do gráfico de um determinado prisma, nem sempre foram utilizados todos os pontos deste gráfico. Alguns pontos, referentes ao início do carregamento, não foram considerados. Por exemplo, os pontos do gráfico do prisma P1 do concreto C1 (figura 5.95a) possuíam valores negativos no eixo das ordenadas até a aplicação da tensão de 2.67 MPa, a partir da qual, os pontos passaram a apresentar valores positivos neste eixo. Estes valores negativos ocorreram por causa dos valores de variação relativa de velocidade negativos existentes na curva acustoelástica do método direto deste prisma (figura 5.87a) no trecho de não linearidade inicial. Neste caso, em que existiram pontos com ordenadas negativas e positivas no gráfico da figura 5.95a, a equação de regressão foi gerada de modo a não incluir os pontos negativos, referentes ao trecho não linear da curva acustoelástica. Então, para o prisma P1 do concreto C1 a equação foi gerada a partir do valor de 3.33 MPa. Observou-se que a equação encontrada para este prisma (ver figura 5.95a)

representou bem o comportamento dos pontos discutido anteriormente, em que, a razão entre as variações relativas de velocidade vai diminuindo com o aumento da tensão no prisma e possui a tendência de se tornar constante. Foram poucos os pontos que não foram utilizados para gerar as equações de regressão de cada gráfico. Todos os pontos não utilizados fizeram parte do início do carregamento dos prismas e eram resultantes de valores de $\Delta V/V_0$ pertencentes ao trecho não linear inicial das curvas acustoelásticas. As equações de regressão apresentaram coeficientes de determinação (R^2) elevados, maiores ou iguais à 0.9, com exceção dos coeficientes referentes aos prismas C1P4 e C2P5, que foram de 0.87 e 0.79, respectivamente.

Este estudo mostrou que existe uma relação entre as variações relativas de velocidade das ondas emitidas pelos métodos indireto e direto que segue um padrão de comportamento: a razão $(\Delta V/V_0)_{\text{ind}}/(\Delta V/V_0)_{\text{dir}}$ sofre redução com o acréscimo de tensão no concreto até atingir valores praticamente constantes a partir de um certo valor de tensão. Este comportamento foi representado matematicamente por meio de equações de regressão que apresentaram bons ajustes. Portanto, por meio destas equações, seria possível obter as curvas acustoelásticas do método direto a partir das curvas acustoelásticas do método indireto e vice – versa. Deste modo, este estudo contribui para agregar conhecimento a respeito da acustoelasticidade em elementos de concreto.

5.4.1.1 Resumo

Foi visto ao longo deste trabalho que as ondas ultrassônicas mais sensíveis à tensão são as longitudinais que se propagam na mesma direção da aplicação da tensão no material, denominadas de OL_{11} . A maior sensibilidade à tensão é uma característica importante das ondas quando se quer avaliar tensões usando o ultrassom, pois, quanto maior a sensibilidade, mais fácil se torna a identificação da variação de velocidade causada pela tensão. No entanto, não é possível emitir as ondas OL_{11} de maneira direta em estruturas reais, pois, não se tem acesso às extremidades dos elementos estruturais. Deste modo, o uso do método de transmissão indireta para emitir as ondas OL_{11} se torna importante. No entanto, faltam estudos sobre o efeito acustoelástico no concreto usando o método indireto. O estudo apresentado neste trabalho mostrou o efeito acustoelástico obtido a partir da emissão das ondas pelo método indireto e que é possível utilizar este método para avaliar tensões em elementos de concreto usando o ultrassom. Inclusive, foi verificado que o uso do método de transmissão indireta pode ser mais vantajoso do que o método de transmissão direta. Primeiro, porque as curvas acustoelásticas

obtidas pelo método indireto apresentaram maior variação relativa de velocidade do que as curvas obtidas pelo método direto quando um mesmo valor de carregamento foi aplicado no prisma. Este fato mostrou que as ondas emitidas de maneira indireta são mais sensíveis à tensão do que as emitidas de maneira direta, ou seja, que o efeito acustoelástico é influenciado pelo método de transmissão das ondas ultrassônicas. Isto pode estar atrelado ao local por onde as ondas se propagam. Outro fato que pode tornar o uso do método de transmissão indireta mais vantajoso é a presença de uma menor não linearidade no início das curvas acustolásticas. Nos prismas ensaiados, não foram obtidas variações relativas de velocidade negativas no trecho inicial das curvas usando o método indireto. Portanto, este estudo mostrou que o método de transmissão indireta pode ser utilizado para a avaliação de tensões com o ultrassom e que o uso dele pode, inclusive, ser mais vantajoso em relação ao uso do método de transmissão direta para esta mesma finalidade.

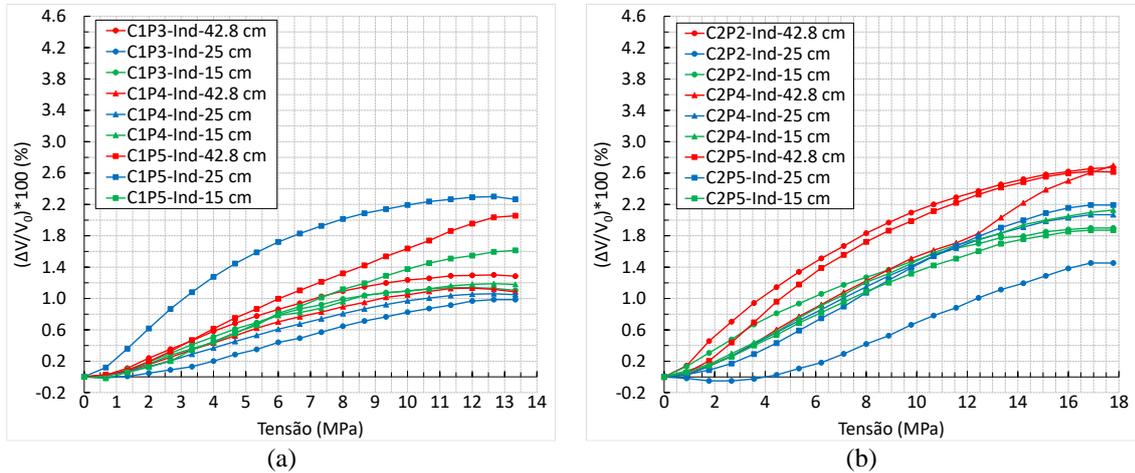
Este estudo também permitiu verificar que existe uma relação entre as variações relativas de velocidade das ondas emitidas de maneira indireta e direta que segue um comportamento padrão. A razão entre estas variações relativas de velocidade apresenta valores que vão diminuindo em função do acréscimo de tensão no concreto até atingir um determinado valor que se torna praticamente constante. Então, a partir de um certo valor de tensão aplicado no concreto, esta razão pode ser considerada constante. Foram geradas equações empíricas que relacionaram a razão entre as variações relativas de velocidade das ondas emitidas pelos métodos indireto e direto com o valor de tensão aplicada no concreto. Os coeficientes de determinação obtidos para estas equações foram altos, geralmente acima de 0.9. Estas equações permitiriam obter as curvas acustoelásticas referentes ao método direto a partir das curvas acustoelásticas obtidas pelo método indireto e vice-versa. Este estudo contribui para aumentar o conhecimento a respeito do fenômeno acustoelástico no concreto.

5.4.2 Análise dos ensaios realizados usando apenas o método de transmissão indireta (Ind)

Neste item, são discutidos os resultados dos ensaios realizados usando apenas o método de transmissão indireta. Nestes ensaios, para um mesmo valor de carregamento aplicado no prisma, as ondas ultrassônicas foram emitidas pelo método indireto usando 3 distâncias diferentes entre os transdutores: 15 cm, 25 cm e 42.8 cm. As figuras 5.98 à 5.100 apresentam as curvas da variação relativa de velocidade das ondas ultrassônicas em função da tensão obtidas com as três distâncias pelo método de transmissão indireta para os prismas de diferentes traços e para a fase de descarregamento dos ensaios. O sinal de referência usado no CWI para

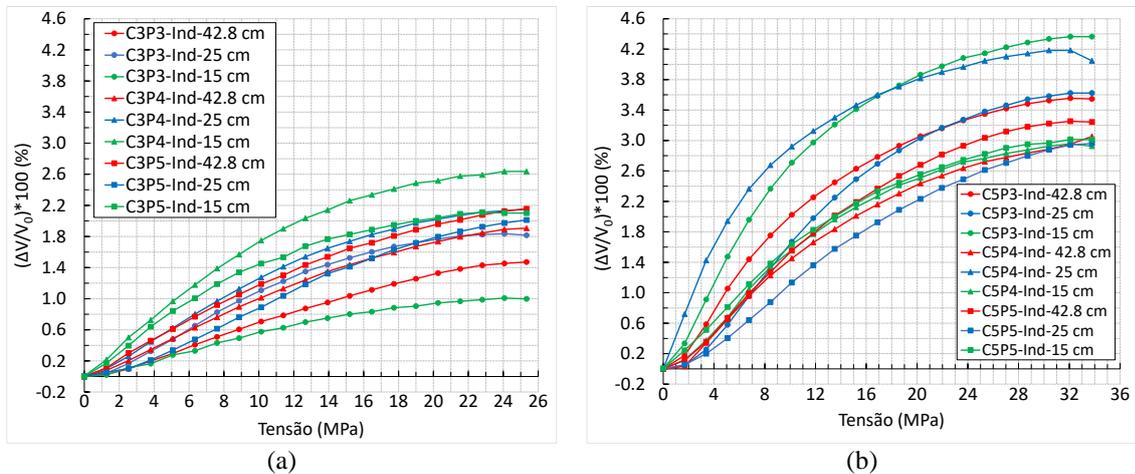
gerar a curva de um ensaio foi o das ondas emitidas no prisma sem tensão logo após o término da fase de descarregamento deste ensaio.

Figura 5.98– Curvas da variação relativa de velocidade em função da tensão usando o método de transmissão indireta com distâncias entre transdutores de 15 cm, 25 cm e 42.8 cm para os concretos (a) C1 e (b) C2.



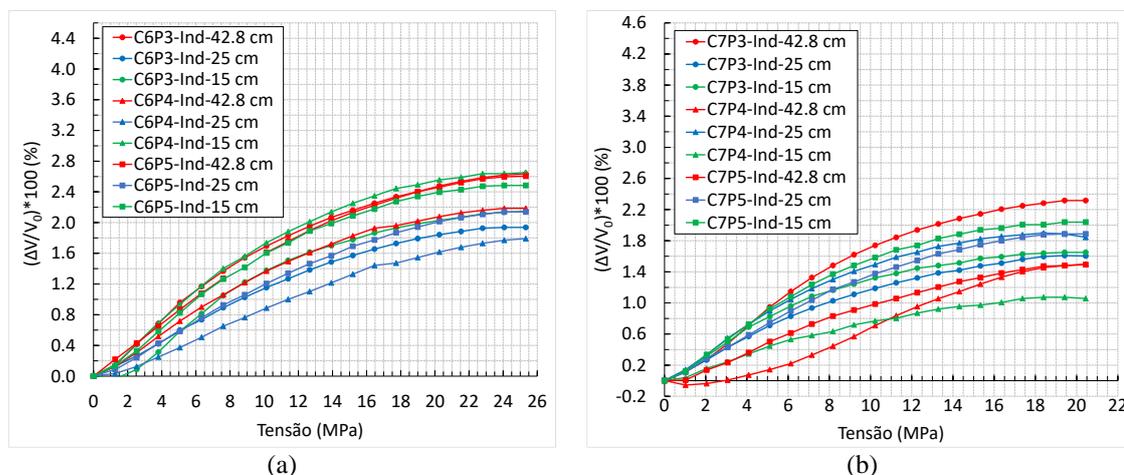
Fonte: Autor.

Figura 5.99– Curvas da variação relativa de velocidade em função da tensão usando o método de transmissão indireta com distâncias entre transdutores de 15 cm, 25 cm e 42.8 cm para os concretos (a) C3 e (b) C5.



Fonte: Autor.

Figura 5.100– Curvas da variação relativa de velocidade em função da tensão usando o método de transmissão indireta com distâncias entre transdutores de 15 cm, 25 cm e 42.8 cm para os concretos (a) C6 e (b) C7.



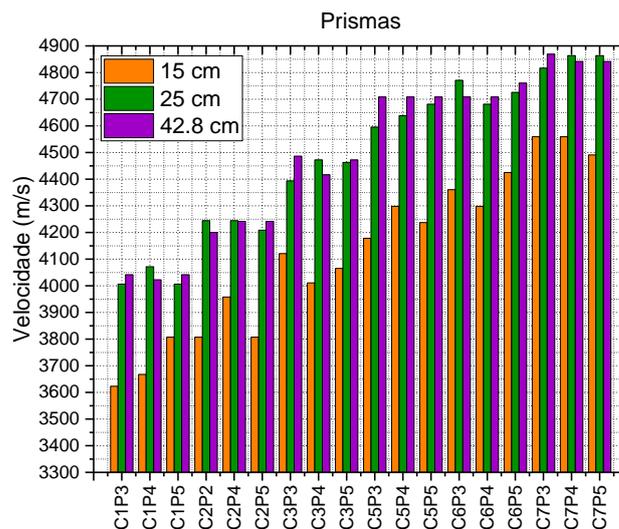
Fonte: Autor.

Os resultados mostraram que o efeito acustoelástico é influenciado pela distância de percurso das ondas ultrassônicas, pois, as curvas acustoelásticas foram diferentes para as diferentes distâncias (figuras 5.98 à 5.100). No entanto, não foi possível encontrar uma relação entre a distância de percurso e a variação relativa de velocidade das ondas. Para iguais valores de carregamento aplicado, tiveram prismas nos quais a maior variação relativa de velocidade ocorreu para a maior distância, de 42.8 cm, outros prismas em que ela ocorreu para a menor distância, de 15 cm e também tiveram prismas em que ela ocorreu com a distância de 25 cm. Os diferentes efeitos acustoelásticos obtidos para as diferentes distâncias de percurso podem estar relacionados à heterogeneidade do material. As ondas propagadas em diferentes regiões da superfície podem ter percorrido regiões com diferentes porosidades, por exemplo. Pode ter existido também maior presença de bolhas de ar numa região de percurso do que em outra. É necessário dar continuidade ao estudo sobre o efeito acustoelástico usando o método de transmissão indireta para buscar entender melhor quais são os fatores que influenciam neste fenômeno e assim poder explicar as causas das diferentes curvas acustoelásticas para as diferentes distâncias de percurso.

Pensando na prática, se for possível utilizar curvas acustoelásticas do concreto obtidas por meio de ensaios em corpos de prova em laboratório para a avaliação de tensões em estruturas reais, a distância entre os transdutores no elemento de concreto real deve ser a mesma distância que foi utilizada no corpo de prova para obter a curva acustoelástica deste material. Portanto, este estudo contribui para aumentar o conhecimento sobre o efeito acustoelástico no concreto e também auxilia no desenvolvimento de um procedimento para a avaliação de tensões em estruturas de concreto reais.

A respeito dos valores de velocidade das ondas ultrassônicas ao se propagarem no prisma sem tensão antes da realização do ensaio, foi verificado que as ondas que percorreram a menor distância, de 15 cm, apresentaram o menor valor de velocidade. Apesar de haver prismas em que as ondas mais velozes foram as que se propagaram na distância de 25 cm, na maioria deles, as ondas mais velozes foram as que se propagaram na maior distância, de 42.8 cm. No entanto, a diferença no valor das velocidades das ondas ao se propagarem em 25 cm e 42.8 cm foi bem pequena em ambos os casos. A figura 5.101 apresenta os valores de velocidade das ondas ao se propagarem pelas diferentes distâncias no prisma. Estes resultados mostraram que as velocidades das ondas ultrassônicas estão relacionadas com as distâncias percorridas por elas. Geralmente, os valores das velocidades das ondas aumentaram quando a distância aumentou.

Figura 5.101– Velocidades das ondas ultrassônicas nos prismas sem tensão ao serem emitidas pelo método de transmissão indireta com distância entre os transdutores de 15 cm, 25 cm e 42.8 cm.



Fonte: Autor.

5.4.2.1 Resumo

Este estudo mostrou que, ao se realizar ensaios ultrassônicos usando o método de transmissão indireta com diferentes distâncias entre os transdutores, a curva acustoelástica obtida para cada distância poderá ser diferente. Nos ensaios realizados com distâncias de 15 cm, 25 cm e 42.8 cm entre os transdutores, as curvas apresentaram diferentes ganhos de velocidade para mesmos valores de tensão aplicada no concreto. Portanto, foi verificado que o efeito acustoelástico é influenciado pela distância de percurso das ondas ao serem emitidas pelo método indireto. Seria necessário realizar mais estudos sobre o efeito acustoelástico usando o

método indireto a fim de poder compreender quais são os fatores que causam as diferentes curvas quando as ondas percorrem distâncias diferentes.

5.4.3 Determinação de uma equação empírica para obter a tensão a partir de C^σ , f_{cm} ou E_{din} usando o método de transmissão indireta

Assim como foi feito para os ensaios usando o método de transmissão direta, foram obtidas equações empíricas a partir dos ensaios usando o método de transmissão indireta. Estes ensaios foram aqueles realizados usando ambos os métodos de transmissão das ondas, direta e indireta (Dir+Ind). Os dados experimentais de $\Delta V/V_0$ referentes à emissão das ondas pelo arranjo indireto foram utilizados para gerar as equações empíricas. Estas equações relacionam o valor da tensão aplicada no concreto com os valores de elementos do tensor constitutivo do material (C^σ), do f_{cm} ou do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}). No método de transmissão indireta, as ondas analisadas foram as OL_{11} (OL_{11ind}), portanto, as equações obtidas são referentes à este tipo de onda ultrassônica. Os casos estudados são os mesmos do método de transmissão direta: Caso 1 e Caso 2 (ver item 5.3.2). Portanto, foram obtidas equações empíricas para a obtenção das tensões a partir de ensaios com as ondas OL_{11ind} para cada um destes casos. Novamente, foi utilizado o software Lab Fit para a obtenção das equações.

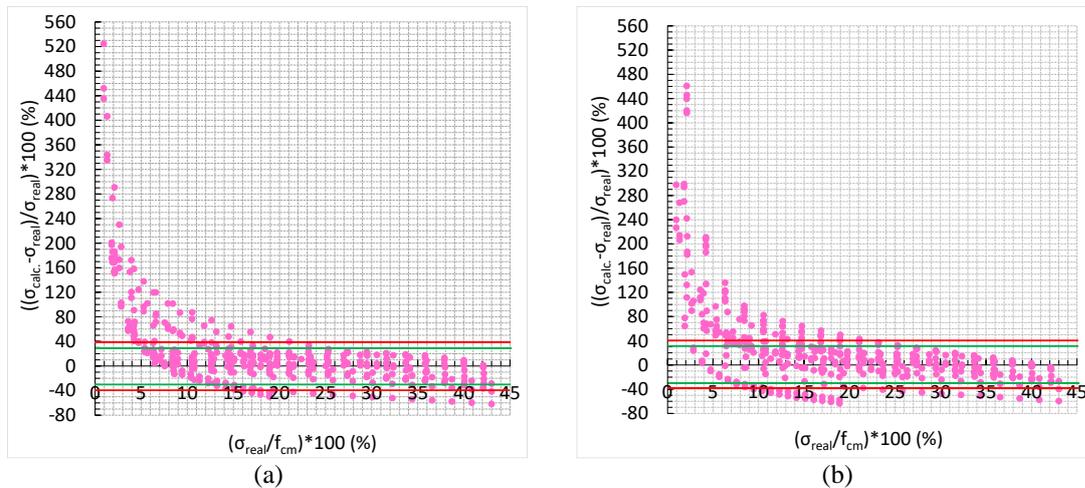
Os termos $(1 + \Delta V/V_0)^2$ foram calculados a partir dos dados experimentais de variação relativa de velocidade para cada valor de tensão aplicada nos 20 prismas ensaiados. Usando o LabFit, foi determinada uma equação de regressão (equação de superfície) relacionando σ/f_{cm} , f_{cm} , e $(1 + \Delta V/V_0)^2$, equação 5.19 (caso 1), e uma equação de regressão relacionado σ , E_{din} , e $(1 + \Delta V/V_0)^2$, equação 5.20 (caso 2). Os valores dos coeficientes de determinação (R^2) estão indicados ao lado das equações.

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = 0.0508 \left[\left(1 + \frac{\Delta V}{V_0} \right)^2 \right]^{\left(0.4098 + \frac{21.3776}{f_{cm}} \right)} ; R^2=0.77 \quad (5.19)$$

$$\sigma = 3.3608 \left[\left(1 + \frac{\Delta V}{V_0} \right)^2 \right]^{\left(0.9409 - \frac{9315.1318}{E_{din}} \right)} ; R^2=0.75 \quad (5.20)$$

Ao usar as equações 5.19 e 5.20 para calcular os valores de tensão (σ_{calc}) a partir dos dados experimentais de f_{cm} , E_{din} e $(1 + \Delta V/V_0)^2$, foram gerados erros para σ_{calc} em relação à tensão real aplicada nos prismas (σ_{real}). Os erros relativos foram obtidos fazendo $(\sigma_{\text{calc}} - \sigma_{\text{real}})/\sigma_{\text{real}}$ e os valores destes erros foram plotados em função da porcentagem de tensão real aplicada ($\%f_{\text{cm}}$), conforme mostram as figuras 5.102a e 5.102b, para os casos 1 e 2 respectivamente. As linhas em verde e em vermelho indicam erros de 30% e 40%, respectivamente.

Figura 5.102 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem de tensão real aplicada ao usar (a) equação 5.19 (caso 1-OL_{11ind}) e (b) equação 5.20 (caso 2-OL_{11ind}).



Fonte: Autor.

Assim como foi observado nos erros relativos obtidos com o método de transmissão direta, os erros usando o método de transmissão indireta foram bastante elevados para carregamentos iniciais, abaixo de $5\%f_{\text{cm}}$. Para tensões reais acima de $20\%f_{\text{cm}}$, os erros máximos estiveram abaixo de $+40\%$. Apesar de existirem erros mínimos maiores do que 40% acima de $20\%f_{\text{cm}}$, a maioria deles estiveram dentro do intervalo de $\pm 40\%$. Foi possível melhorar os erros no cálculo das tensões ao determinar uma equação empírica usando apenas os dados experimentais referentes à aplicação da tensão real de até $20\%f_{\text{cm}}$. Então, foram geradas duas novas equações para os casos 1 e 2, que geraram menores erros no cálculo das tensões quando utilizadas até este valor de tensão real aplicada. Estas equações são as 5.21 e 5.22, para os casos 1 e 2, respectivamente. Para o caso 1, também foi possível melhorar os erros obtidos quando a tensão real aplicada foi maior do que $20\%f_{\text{cm}}$ ao gerar uma equação empírica usando apenas os dados experimentais referentes à aplicação de tensão real acima de $20\%f_{\text{cm}}$. Esta equação é a 5.23. No caso 2, também foi feito isto. No entanto, a equação resultante não gerou erros melhores do que a equação já utilizada anteriormente (equação 5.20). A figura 5.103 mostra os erros relativos em função da tensão aplicada para o caso 2. Nesta figura, são apresentados

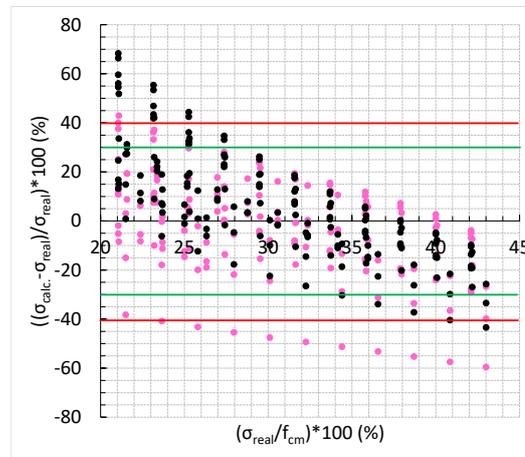
apenas os erros referentes às tensões aplicadas acima de $20\%f_{cm}$. As tensões foram calculadas usando a equação 5.20 e uma nova equação para o caso 2, gerada a partir dos dados experimentais referentes à aplicação da tensão real acima de $20\%f_{cm}$. Os pontos em preto e em rosa, na figura 5.103, são os erros obtidos usando esta nova equação e a equação 5.20 para o cálculo das tensões, respectivamente. Observou-se que uma parte dos erros melhorou ao usar a nova equação no lugar da equação 5.20, pois, os erros mínimos diminuíram significativamente em valor absoluto. Antes, com a equação 5.20, eles eram maiores do que 40% e com a nova equação ficaram menores que 40%. No entanto, outra parte dos erros piorou, já que houve também um aumento significativo nos valores dos erros máximos ao adotar a nova equação. Os erros eram de no máximo 40% com a equação 5.20 e passaram a ter valores bem maiores com a nova equação. Então, para o caso 2, não foi adotada uma nova equação para o intervalo de tensões reais acima de $20\%f_{cm}$. Sendo assim, para o caso 1 foram adotadas as equações 5.21 e 5.23 para o cálculo das tensões quando a tensão real aplicada foi menor e maior do que $20\%f_{cm}$, respectivamente. Para o caso 2, foram adotadas as equações 5.22 e 5.20 para este cálculo quando a tensão real aplicada foi menor e maior do que $20\%f_{cm}$, respectivamente.

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = 0.0454 \left[\left(1 + \frac{\Delta V}{V_0} \right)^2 \right]^{\left(0.2970 + \frac{26.4601}{f_{cm}} \right)} ; R^2=0.66 \quad (5.21)$$

$$\sigma = 3.9021 \left[\left(1 + \frac{\Delta V}{V_0} \right)^2 \right]^{\left(1.6432 - \frac{52742.37}{E_{din}} \right)} ; R^2=0.62 \quad (5.22)$$

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = 0.1542 \left[\left(1 + \frac{\Delta V}{V_0} \right)^2 \right]^{\left(0.1570 + \frac{9.0503}{f_{cm}} \right)} ; R^2=0.22 \quad (5.23)$$

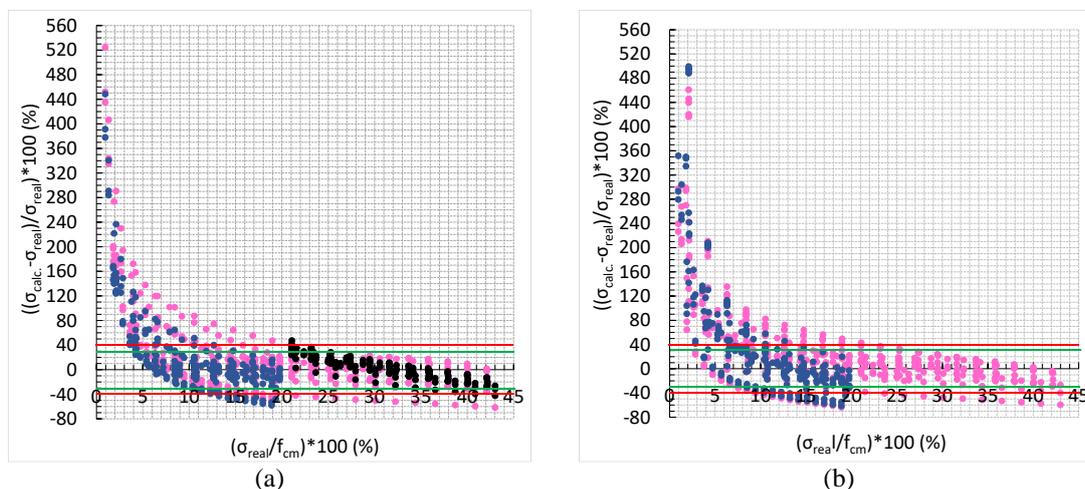
Figura 5.103 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem de tensão real aplicada para o caso 2 ao usar a equação 5.20, obtida com os dados experimentais de todo o carregamento (pontos em rosa) e a nova equação, obtida com os dados experimentais a partir da tensão aplicada de 20% f_{cm} (pontos em preto).



Fonte: Autor.

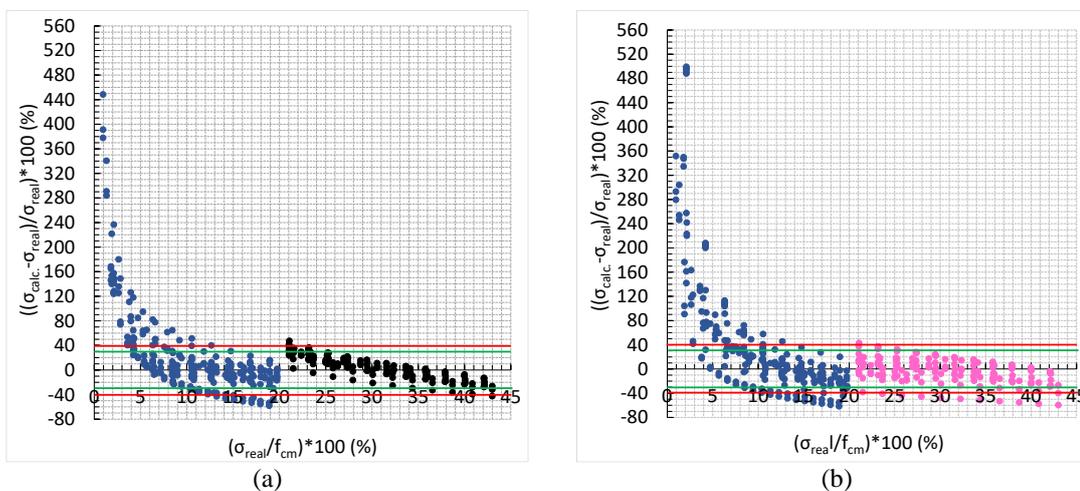
As figuras 5.104a e 5.104b mostram os erros relativos no cálculo das tensões ao usar as diferentes equações nos casos 1 e 2, respectivamente. Os pontos em rosa são os erros relativos obtidos ao usar as equações 5.19 (caso 1) e 5.20 (caso 2). São os mesmos gráficos das figuras 5.102a e 5.102b. Nas figuras 5.104a e 5.104b, os pontos em azul mostram os erros obtidos ao usar as equações 5.21 e 5.22, respectivamente, para calcular as tensões até o carregamento real aplicado de 20% f_{cm} . Os pontos em preto na figura 5.104a indicam os erros obtidos ao calcular as tensões usando a equação 5.23, quando o carregamento aplicado foi maior do que 20% f_{cm} . As figuras 5.105a e 5.105b mostram os erros ao utilizar apenas as equações adotadas para os casos 1 e 2, respectivamente.

Figura 5.104 – Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem de tensão real aplicada ao usar (a) Caso 1 (OL_{1ind}): equação 5.19 (pontos em rosa), equação 5.21 (pontos em azul) e a equação 5.23 (pontos em preto) e (b) Caso 2 (OL_{1ind}): equação 5.22 (pontos em azul) e equação 5.20 (pontos em rosa).



Fonte: Autor.

Figura 5.105 – Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem de tensão real aplicada ao usar apenas as equações adotadas para (a) Caso 1 (OL_{1ind}): equação 5.21 (pontos em azul) e a equação 5.23 (pontos em preto) e (b) Caso 2 (OL_{1ind}): equação 5.22 (pontos em azul) e equação 5.20 (pontos em rosa).

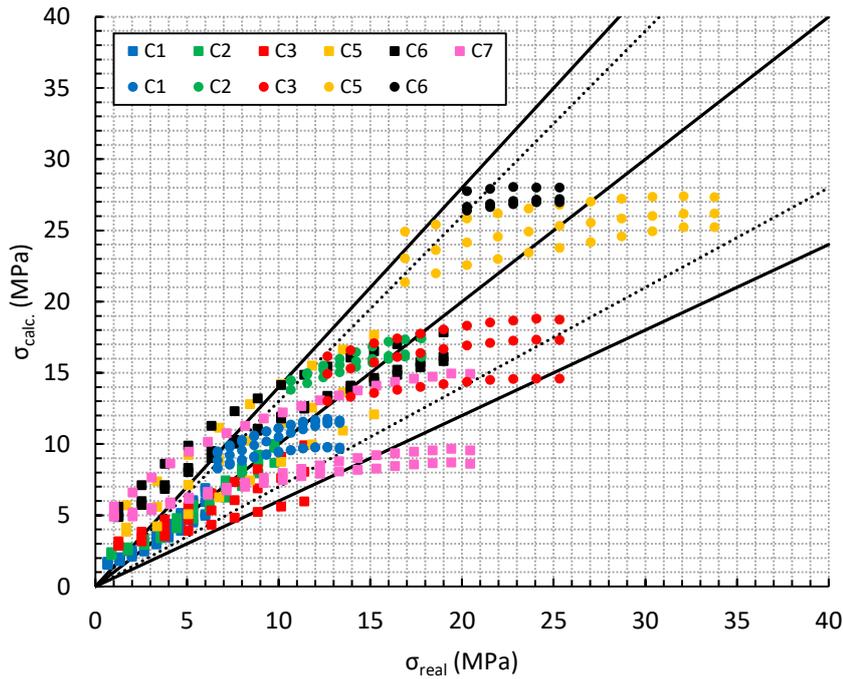


Fonte: Autor.

Observou-se uma melhora significativa nos erros máximos ao usar as equações 5.21 e 5.22 para calcular tensões quando a tensão aplicada foi menor do que $20\% f_{cm}$. Com o uso desta equação, os erros máximos ficaram abaixo de $+40\%$ para valores de tensão real aplicada acima de $10\% f_{cm}$. O uso da equação 5.23, no caso 1, também melhorou os erros calculados quando a tensão aplicada foi maior do que $20\% f_{cm}$. Os erros ficaram dentro do intervalo de $\pm 40\%$ com o uso desta equação. Para ambos os casos, 1 e 2, a maioria dos valores de tensão calculada apresentaram erros que estiveram dentro do intervalo de $\pm 40\%$ quando a tensão real aplicada foi maior do que $10\% f_{cm}$.

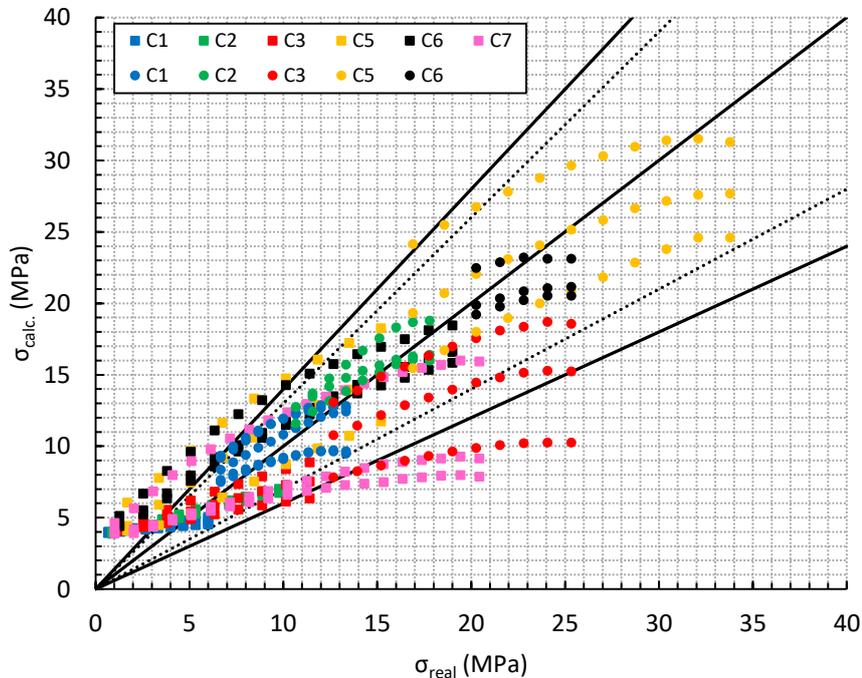
As figuras 5.106 e 5.107 apresentam as tensões calculadas em função da tensão real aplicada nos prismas para os casos 1 e 2, respectivamente. A reta inclinada central em preto indica valores iguais de tensão calculada e real. As retas inclinadas contínuas acima e abaixo da reta central indicam valores de tensões calculadas com erros de $+40\%$ e -40% , respectivamente. Por fim, as retas tracejadas acima e abaixo da reta central indicam erros com $+30\%$ e -30% , respectivamente. Os marcadores quadrangulares e circulares indicam as tensões calculadas por meio das equações 5.21 e 5.23, respectivamente, para o caso 1, e por meio das equações 5.22 e 5.20, respectivamente, para o caso 2.

Figura 5.106 – Tensão calculada (σ_{calc}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 1 (OL_{11ind}) ao usar as equações 5.21 e 5.23 quando as tensões reais aplicadas foram de até 20% f_{cm} e maiores que 20% f_{cm} , respectivamente.



Fonte: Autor.

Figura 5.107 – Tensão calculada (σ_{calc}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 2 (OL_{11ind}) ao usar as equações 5.22 e 5.20 quando as tensões reais aplicadas foram de até 20% f_{cm} e maiores que 20% f_{cm} , respectivamente.



Fonte: Autor.

Assim como foi observado nas figuras 5.104a e 5.104b, verificou-se, nas figuras 5.106 e 5.107, que a quantidade maior de medidas com erros acima de +40% ocorreu para

carregamentos iniciais, mais baixos. Em ambos os casos, 1 e 2, até a tensão aplicada de aproximadamente 10 MPa, existiram tensões reais sendo superestimadas com erros maiores do que +40%. A partir de 10 MPa, ocorreu o contrário, pois, deixaram de existir tensões superestimadas com erros maiores do que +40% e passou a ocorrer tensões subestimadas com erros menores do que -40%. Em ambos os casos, a maioria das medidas apresentaram erros dentro do intervalo de $\pm 40\%$. No entanto, as equações obtidas para o caso 1 das ondas diretas OC₂₁ (figuras 5.64 e 5.67) continuam fornecendo os menores erros para o cálculo das tensões. Verificou-se também nas figuras 5.106 e 5.107 que os maiores erros no cálculo das tensões ocorreram com prismas de concreto de resistência à compressão média mais elevadas. Pois, a maioria dos pontos dos gráficos com erros acima de +40% ou abaixo de -40% são referentes à prismas dos concretos C7, C6 e C5.

5.4.4 Determinação de uma equação empírica para obter a tensão a partir de $\Delta V/V_0$, f_{cm} ou E_{din} usando o método de transmissão indireta

Também foram obtidas equações empíricas a partir dos ensaios com as medidas indiretas ao relacionar o valor da tensão aplicada nos prismas com os valores experimentais de $\Delta V/V_0$ e f_{cm} ou do E_{din} . Estes ensaios foram, novamente, aqueles realizados usando ambos os métodos de transmissão das ondas, direta e indireta (Dir+Ind). Os dados experimentais de $\Delta V/V_0$ referentes à emissão das ondas pelo arranjo indireto foram utilizados para gerar as equações empíricas. Então, os casos estudados foram os mesmos do método de transmissão direta: Caso 3 e Caso 4 (ver item 5.3.3). Portanto, foram determinadas equações para a obtenção da tensão no concreto a partir de ensaios com as ondas OL_{11ind} para cada um destes casos.

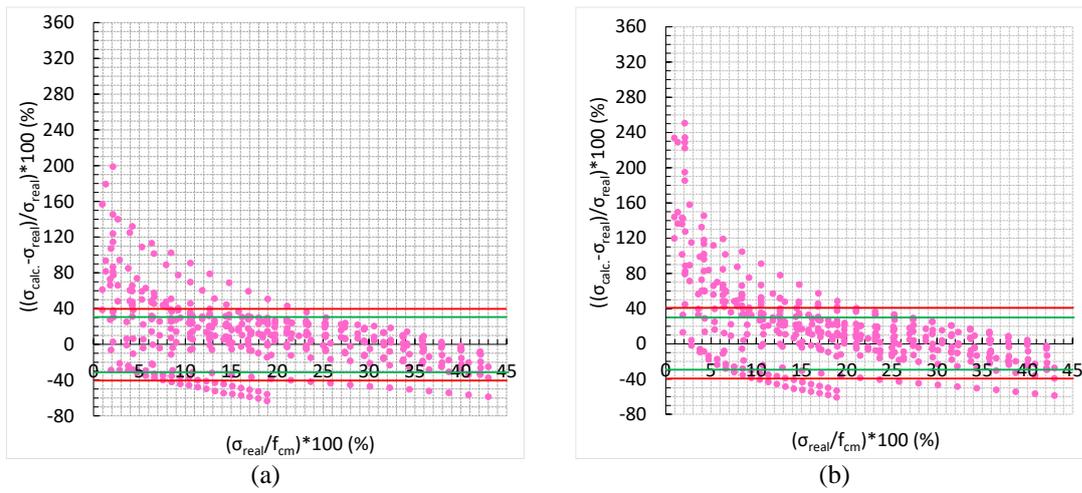
Os valores de $\Delta V/V_0$ obtidos para cada valor de tensão aplicada nos 20 prismas ensaiados foram utilizados para gerar as equações. Usando o LabFit, foi determinada uma equação de superfície relacionando σ/f_{cm} , f_{cm} e $\Delta V/V_0$, equação 5.24 (caso 3) e outra equação de superfície ao relacionar σ , E_{din} e $\Delta V/V_0$, equação 5.25 (caso 4).

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \left(0.1626 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / (1.6879 + 0.09610 f_{cm}); R^2 = 0.79 \quad (5.24)$$

$$\sigma = \left(0.2688 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / (0.2089 - 0.1668 \times 10^{-5} E_{din}); R^2 = 0.75 \quad (5.25)$$

A partir dos dados experimentais de f_{cm} , E_{din} e $\Delta V/V_0$, as tensões foram calculadas (σ_{calc}) usando as equações 5.24 e 5.25. Os erros relativos no cálculo das tensões em função da porcentagem de tensão real aplicada nos prismas ($\%f_{cm}$) estão apresentados nas figuras 5.108a e 5.108b para os casos 3 e 4, respectivamente. Nestas figuras, as linhas em verde e vermelho indicam erros de 30% e 40%, respectivamente.

Figura 5.108 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem de tensão real aplicada ao usar (a) equação 5.24 (caso 3-OL_{11ind}) e (b) equação 5.25 (caso 4-OL_{11ind}).



Fonte: Autor.

Assim como nos casos 1 ao 4 do método de transmissão direta (figuras 5.61, 5.62, 5.69, 5.70, 5.75, 5.76, 5.80 e 5.81) e como nos casos 1 e 2 do método de transmissão indireta (figuras 5.102a e 5.102b), observou-se nas figuras 5.108a e 5.108b que os erros relativos são bastante elevados para carregamentos iniciais, abaixo de $5\%f_{cm}$. No entanto, eles vão diminuindo com o acréscimo de tensão aplicada nos prismas. Nas figuras 5.108a e 5.108b, também observou-se que, a partir da tensão real aplicada de $20\%f_{cm}$, os erros máximos estiveram abaixo de $+40\%$ e que, apesar de existirem erros mínimos abaixo de -40% , a maioria deles estiveram dentro do intervalo de $\pm 40\%$. O mesmo ocorreu com os casos 1 e 2 do método de transmissão indireta. Ao determinar uma nova equação empírica apenas com os dados experimentais referentes à aplicação de tensão real de até $20\%f_{cm}$, foi possível melhorar os erros relativos obtidos no cálculo das tensões para os casos 3 e 4 quando a tensão real aplicada foi até $20\%f_{cm}$. Estas equações são as 5.26 e 5.27, respectivamente. Para o caso 3, também foi possível melhorar os erros relativos obtidos quando a tensão real aplicada foi superior à $20\%f_{cm}$ ao gerar uma nova equação empírica usando apenas os dados experimentais referentes às tensões reais aplicadas acima deste valor (equação 5.28). No caso 4, também foi gerada uma nova equação usando apenas os dados experimentais referentes às tensões acima de $20\%f_{cm}$ a fim de verificar se os

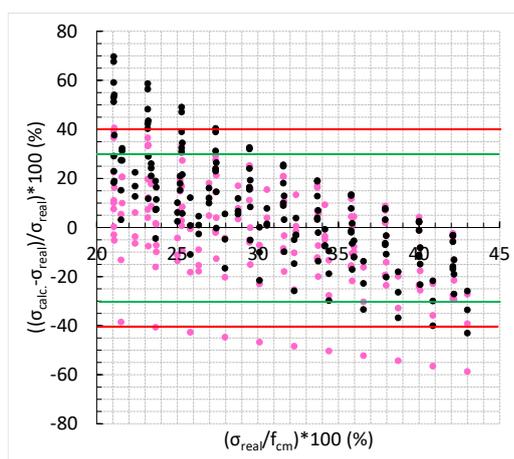
erros no cálculos das tensões melhorariam o usar esta nova equação quando a porcentagem real de tensão aplicada fosse superior $20\%f_{cm}$. No entanto, os erros calculados usando esta nova equação não melhoraram. Assim como ocorreu no caso 2 do método de transmissão indireta, parte dos erros melhorou e outra parte piorou, conforme mostra a figura 5.109. Então, não compensou adotar uma nova equação no lugar da 5.25 para calcular as tensões no concreto quando a tensão real aplicada foi superior à $20\%f_{cm}$. Portanto, para o caso 3 foram adotadas as equações 5.26 e 5.28 quando a tensão real aplicada foi menor e maior do que $20\%f_{cm}$, respectivamente. Para o caso 4, foram adotadas as equações 5.27 e 5.25 para tensões reais aplicadas abaixo e acima de $20\%f_{cm}$, respectivamente.

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \left(0.3770 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / \left(4.2554 + 0.1029 f_{cm} \right); R^2 = 0.64 \quad (5.26)$$

$$\sigma = \left(0.6149 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / \left(0.6055 - 0.8435 \times 10^{-5} E_{din} \right); R^2 = 0.70 \quad (5.27)$$

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \left(2.3257 + \frac{\Delta V}{V_0} \right) / \left(8.3451 + 0.09511 f_{cm} \right); R^2 = 0.24 \quad (5.28)$$

Figura 5.109 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem de tensão real aplicada para o caso 4 usando a equação 5.25, obtida com os dados experimentais de todo o carregamento (pontos em rosa), e uma nova equação, obtida com os dados experimentais a partir da tensão aplicada de $20\%f_{cm}$ (pontos em preto).

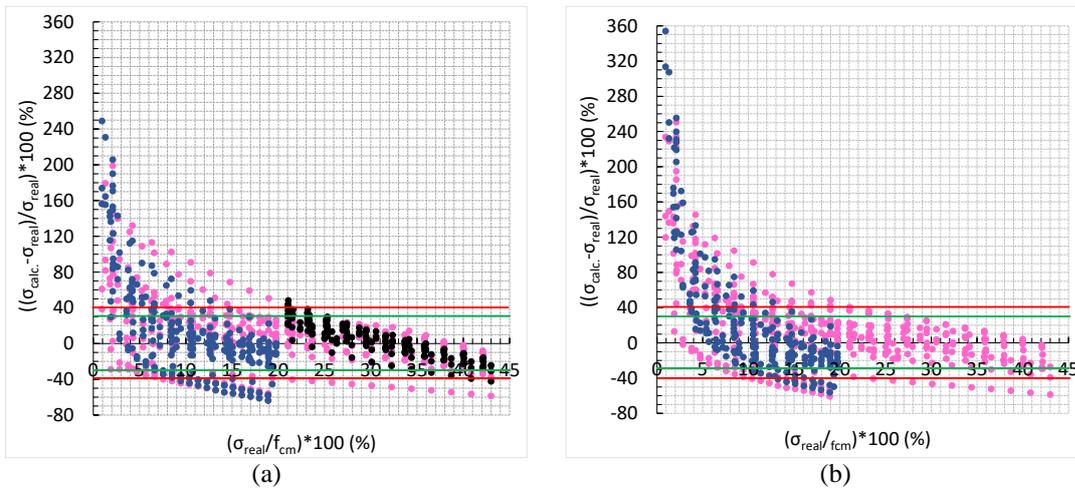


Fonte: Autor.

As figuras 5.110a e 5.110b mostram os erros relativos no cálculo das tensões em função da porcentagem de tensão aplicada para os casos 3 e 4, respectivamente. Os pontos na cor rosa são os erros obtidos ao usar as equações 5.24 (caso 3) e 5.25 (caso 4) e formam os mesmos gráficos apresentados nas figuras 5.108a e 5.108b, respectivamente. Nas figuras 5.110a e 5.110b, os pontos em azul indicam os erros relativos ao usar as equações 5.26 e 5.27,

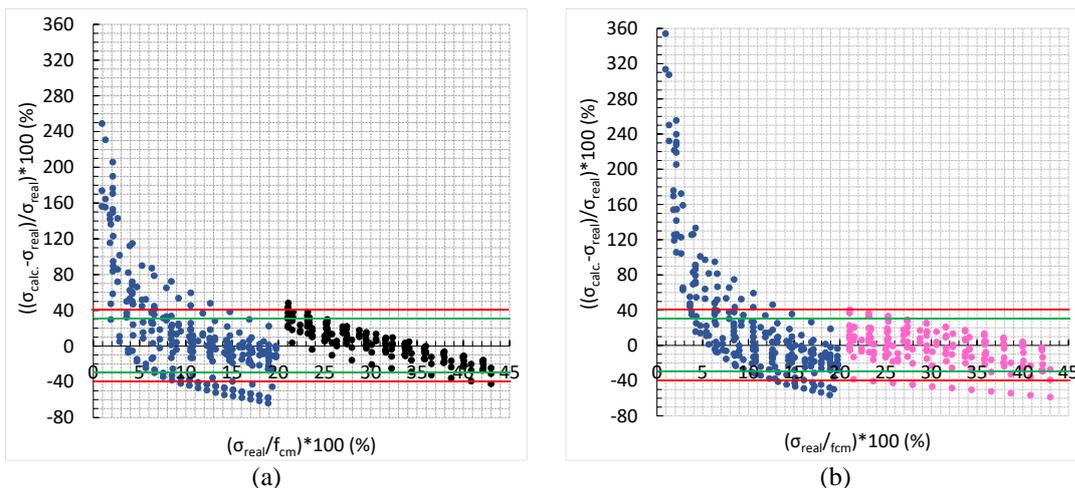
respectivamente, para o cálculo das tensões quando a tensão real aplicada foi de até $20\%f_{cm}$. Por fim, os pontos em preto da figura 5.110a mostram os erros ao usar a equação 5.28 no cálculo das tensões quando a tensão real aplicada foi maior do que $20\%f_{cm}$. As figuras 5.111a e 5.111b mostram os erros obtidos ao usar apenas as equações adotadas para os casos 3 e 4, respectivamente.

Figura 5.110 – Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar (a) Caso 3 (OL_{1ind}): equação 5.24 (pontos em rosa), equação 5.26 (pontos em azul) e a equação 5.28 (pontos em preto) e (b) Caso 4 (OL_{1ind}): equação 5.27 (pontos em azul) e equação 5.25 (pontos em rosa).



Fonte: Autor.

Figura 5.111 - Erro relativo no cálculo da tensão em função da porcentagem da tensão real aplicada ao usar apenas as equações adotadas para (a) Caso 3 (OL_{1ind}): equação 5.26 (pontos em azul) e a equação 5.28 (pontos em preto) e (b) Caso 4 (OL_{1ind}): equação 5.27 (pontos em azul) e equação 5.25 (pontos em rosa).



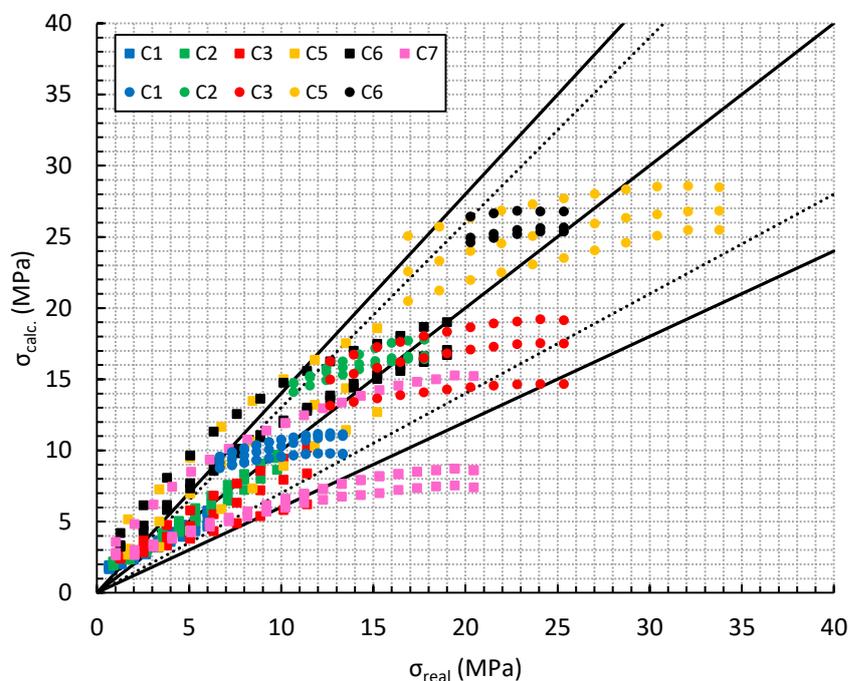
Fonte: Autor.

Ao usar as equações 5.26 e 5.27, os erros máximos melhoraram significativamente (figuras 5.110a e 5.110b). Ao usar a equação 5.28 (figura 5.110a), foi observada uma melhora significativa nos erros mínimos. Observou-se que, a partir de $13\%f_{cm}$, os erros máximos

ocorridos ao longo da aplicação de todo o carregamento ficaram abaixo de 40% em ambos os casos. Os erros mínimos foram menores que 40% a partir da tensão real aplicada de 20% f_{cm} para o caso 3. Para ambos os casos, a maioria dos erros estiveram dentro do intervalo de $\pm 40\%$ a partir da tensão aplicada de 13% f_{cm} .

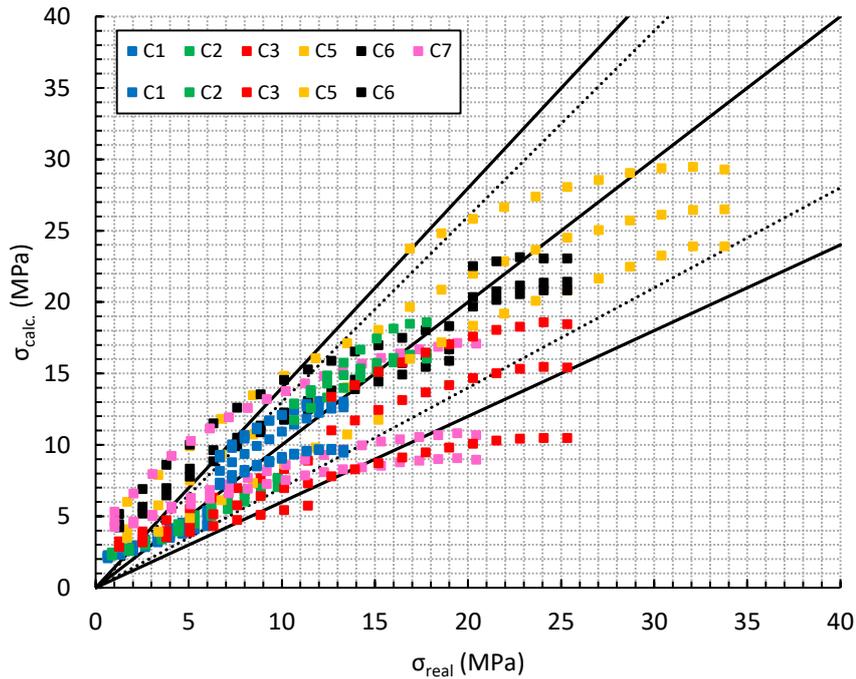
As figuras 5.112 e 5.113 apresentam as tensões calculadas em função da tensão real aplicada nos prismas para os casos 3 e 4, respectivamente. Os marcadores quadrangulares e circulares indicam as tensões calculadas ao usar as equações 5.26 e 5.28, respectivamente, para o caso 3 e ao usar as equações 5.27 e 5.25, respectivamente, para o caso 4.

Figura 5.112 – Tensão calculada (σ_{calc}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 3 (OL_{11ind}) ao usar as equações 5.26 e 5.28 quando as tensões reais aplicadas foram de até 20% f_{cm} e maiores que 20% f_{cm} , respectivamente.



Fonte: Autor.

Figura 5.113 – Tensão calculada (σ_{calc}) em função da tensão real (σ_{real}) para o caso 4 (OL_{11ind}) ao usar as equações 5.27 e 5.25 quando as tensões reais aplicadas foram de até 20% f_{cm} e maiores que 20% f_{cm} , respectivamente.



Fonte: Autor.

Assim como nos casos 1 e 2 do método de transmissão indireta (figuras 5.106 e 5.107), observou-se nas figuras 5.112 e 5.113 que existiram tensões superestimadas com erros superiores à 40% até a tensão real aplicada de 10 MPa. A partir deste valor de tensão aplicada, passaram a ocorrer tensões subestimadas com erros maiores do que 40%. Tanto no caso 3 quanto no caso 4, a maioria dos erros ficaram dentro do intervalo de $\pm 40\%$. Observou-se também que os maiores erros no cálculo das tensões ocorreram com os prismas de resistências mais elevadas, cujos concretos foram: C7, C6 e C5. Entre todos os casos estudados (casos 1 ao 4) para os métodos de transmissão direta e indireta, o caso 1 com as ondas diretas OC₂₁ (figuras 5.64 e 5.67) foi o que apresentou os menores erros no cálculo das tensões.

6. CONCLUSÃO

6.1 Considerações finais

Este trabalho foi dividido em duas partes que consistiram em um desenvolvimento analítico e em um programa experimental.

No desenvolvimento analítico, verificou-se que o tensor constitutivo, C_{ijkl} , de um material isotrópico sem tensão se torna anisotrópico quando é aplicada tensão, pois, é dependente das deformações do material. Além disto, C_{ijkl} do material isotrópico sob tensão não é simétrico. A anisotropia do tensor constitutivo do material sob tensão explica o fato de as velocidades das ondas ultrassônicas serem dependentes da direção de propagação no sólido sob tensão, uma vez que elas são influenciadas pelas propriedades elásticas do material. Além disto, a variação dos valores dos elementos do tensor constitutivo em função da variação da deformação do material explica o fato de as velocidades de um mesmo tipo de onda se alterarem ao se propagarem numa mesma direção de um sólido submetido à diferentes valores de tensão aplicada. Verificou-se também que o tensor constitutivo do material sob tensão resultará dependente das deformações ao adotar apenas uma das hipóteses de Hugues e Kelly na equação de energia específica do material. Ou seja, ao considerar não desprezíveis os termos de terceira ordem (hipótese A) ou que a medida de deformação é a de Green (hipótese B). Portanto, a adoção de apenas uma destas hipóteses já mostra a dependência da velocidade das ondas com a tensão aplicada. Este estudo contribui para aumentar o conhecimento a respeito da teoria da acustoelasticidade.

Foi proposta uma formulação para a avaliação de tensões com o ultrassom por meio do conhecimento do tensor constitutivo sem que fosse necessário incorporar termos de terceira ordem na equação da energia específica de deformação do material, nem utilizar a medida de deformação de Green. Com isto, a equação resultante não dependeu das constantes de Murnagahn (l , m e n). Nesta proposta, a ideia foi não depender de novas constantes (l , m e n) e continuar a trabalhar com as constantes já conhecidas da teoria da elasticidade, considerando apenas que os elementos do tensor C_{ijkl} são variáveis com a tensão.

No programa experimental, verificou-se que o ensaio num elemento de concreto para a obtenção da curva acustoelástica não pode ser realizado no primeiro ciclo de carregamento e descarregamento deste elemento ou num outro ciclo qualquer. É necessária a aplicação de uma certa quantidade de ciclos para que a curva se estabilize e possa ser considerada representativa para um determinado concreto. Observou-se que a aplicação de 10 ciclos de carregamento e

descarregamento é suficiente para garantir que as curvas acustoelásticas das ondas OL_{11} , OC_{12} , OL_{22} e OC_{21} estejam estabilizadas no ciclo seguinte (ciclo 11). Além disto, se for necessário realizar novos ensaios num elemento de concreto em um dia diferente ao da estabilização das curvas, será necessário aplicar pelo menos um ciclo de carregamento para estabilizar novamente a curva para esta fase e realizar o ensaio no ciclo seguinte. No entanto, as curvas para a fase de descarregamento já estarão estabilizadas no primeiro ciclo de descarregamento. Então, se o objetivo for obter a curva para esta fase, não será necessário aplicar pré-ciclos no elemento a fim de obter a curva estabilizada. Verificou-se também que as curvas para a fase de descarregamento apresentam maior efeito acustoelástico do que as curvas da fase de carregamento. Além disto, quando não se tem conhecimento sobre a fase na qual um elemento de concreto que se quer avaliar a tensão se encontra, carregamento ou descarregamento, seria melhor utilizar a curva da fase de descarregamento para relacionar as velocidades das ondas propagadas através dele com os níveis de tensão. Assim, os possíveis desvios na obtenção da tensão seriam menores do que ao utilizar a curva da fase de carregamento. Como as curvas acustoelásticas para a fase de descarregamento apresentam o maior efeito acustoelástico e fornecem os menores desvios no cálculo das tensões quando não se sabe em que fase (carregamento ou descarregamento) se encontra um elemento de concreto, elas se mostram as mais adequadas para a avaliação de tensões usando o ultrassom.

Por meio dos ensaios pelo método de transmissão direta nos prismas de concreto com diferentes traços, foi observado que as curvas acustoelásticas podem ser diferentes mesmo para prismas de mesmo traço e concretados na mesma betonada. Foi observado também que as ondas ultrassônicas OL_{11} e as OC_{21} , além de serem as mais sensíveis à tensão, são os tipos de ondas ultrassônicas que fornecem curvas acustoelásticas com menores trechos de não linearidade inicial. Sendo assim, nestas questões, as ondas OL_{11} e as OC_{21} , se mostraram as mais adequadas para serem usadas para a avaliação de tensões pelo método de transmissão direta. Por meio dos ensaios pelo método de transmissão direta nos prismas de concreto com diferentes traços, também foi visto que o efeito acustoelástico é influenciado pelas propriedades do material como o f_{cm} e o E_{din} . Provavelmente, existem outros fatores que influenciam este efeito, no entanto, neste trabalho não foi possível verificar. Sabendo-se desta influência, foram determinadas equações empíricas para a estimativa da tensão no concreto por meio do conhecimento das propriedades do material, f_{cm} ou E_{din} e $\Delta V/V_0$. Também foram encontradas equações para estimar a tensão neste material por meio do conhecimento do tensor constitutivo do mesmo ao invés de $\Delta V/V_0$. No geral, os erros no cálculo das tensões ao usar estas equações ficaram em torno de 40% para porcentagens de tensões aplicadas acima de $5\%f_{cm}$. As equações que

forneceram os menores erros no cálculo das tensões foram as referentes às ondas OC₂₁. Erros de 40% no cálculo das tensões podem parecer bastante elevados. No entanto, quando é necessário conhecer o estado de tensão nos elementos estruturais de uma obra para a qual não se tem o projeto estrutural, nem alguma ideia sobre o estado de tensão em que eles se encontram, a estimativa do valor da tensão, mesmo com erros desta ordem de grandeza, já fornece uma ideia sobre as condições dos elementos que pode ajudar em alguma tomada de decisão.

A partir dos ensaios realizados usando o método da transmissão indireta nos prismas, foi possível verificar o efeito acustoelástico usando este método. Com isto, ficou comprovada a viabilidade deste método de ensaio para ser usado na avaliação de tensões com o ultrassom. Este método, inclusive, se mostrou mais favorável à análises de tensões do que o método de transmissão direta em relação à dois aspectos observados. O primeiro deles diz respeito à sensibilidade das ondas à tensão. Foi verificado que as ondas emitidas pelo método indireto são mais sensíveis à tensão do que aquelas emitidas pelo método direto. Com isto, o efeito acustoelástico é maior para o primeiro caso, o que é favorável para a avaliação de tensões. O segundo deles é que foi observado que as não linearidades no início das curvas acustoelásticas são bem mais suaves quando a curva é obtida pela emissão das ondas pelo método indireto. Não ocorreram variações relativas de velocidade negativas nestes trechos não lineares ao usar o método indireto, o que foi observado ao usar o método direto. Foi verificado também que existe uma tendência de comportamento na razão entre as variações relativas de velocidade das ondas emitidas pelos métodos indireto e direto. O valor desta razão, geralmente, diminui com o acréscimo de tensão no concreto e se torna praticamente constante a partir de um certo valor de tensão no material. Foram determinadas equações empíricas que representaram bem este comportamento, com coeficientes de determinação acima de 0.9. O estudo com as emissões das ondas pelo método indireto também mostrou que o efeito acustoelástico é influenciado pela distância de percurso das ondas ultrassônicas. Pois, as curvas acustoelásticas obtidas para diferentes distâncias entre os transdutores resultaram diferentes. Neste trabalho, não foi encontrada uma explicação para os diferentes comportamentos das curvas em função das diferentes distâncias de percurso das ondas. Para os ensaios com o método de transmissão indireta também foram determinadas equações empíricas para a avaliação da tensão no concreto por meio do conhecimento de f_{cm} ou E_{din} e $\Delta V/V_0$ e equações para estimar a tensão neste material por meio do conhecimento do seu tensor constitutivo ao invés de $\Delta V/V_0$.

O estudo realizado neste trabalho explorou o efeito acustoelástico no concreto. Com isto, algumas questões foram esclarecidas e outras questões foram levantadas, o que mostra a necessidade de dar continuidade à este estudo em pesquisas futuras. Este trabalho contribui para

aumentar o conhecimento sobre a acustoelasticidade no campo teórico e experimental. Neste último, além de contribuir para o avanço no conhecimento sobre o efeito acustoelástico em elementos de concreto, auxilia na obtenção de um procedimento de ensaio confiável para estudar a acustoelasticidade neste material e no desenvolvimento de futuros procedimentos para a avaliação de tensões no concreto *in situ* usando o ultrassom. O aprofundamento no conhecimento sobre a acustoelasticidade se faz necessário para que, futuramente, possa ser desenvolvido um procedimento válido para a avaliação de tensões em estruturas *in situ* por meio da propagação das ondas ultrassônicas.

6.2 Propostas para trabalhos futuros

- Realizar estudos sobre os fatores que influenciam o efeito acustoelástico no concreto além da tensão. Por meio deste estudo, buscar explicar as diferentes curvas acustoelásticas para concretos de mesmo traço. Além disto, a partir do conhecimento de um número maior de variáveis que influenciam no efeito acustoelástico, buscar novas equações empíricas que relacionem estas variáveis, $\Delta V/V_0$ ou $(1+\Delta V/V_0)^2$ e σ .
- Estudar a não linearidade inicial da curva acustoelástica afim de compreender o que causa este comportamento.
- Dar continuidade ao estudo sobre o método de transmissão indireta no concreto para buscar a causa da diferença entre as curvas acustoelásticas obtidas pelo método direto e indireto. Além disto, para poder compreender porque estas curvas são diferentes quando a distância entre os transdutores é diferente. Ou seja, buscar entender a razão para a influência da distância de percurso das ondas sobre o efeito acustoelástico.
- Estudar a acustoelasticidade no aço, incluindo barras de aço utilizadas como armaduras no concreto armado.
- Realizar estudos experimentais em um grande número de elementos de concreto de variadas resistências à compressão a fim de determinar uma equação empírica que forneça o valor de C^0 a partir do f_{cm} .

- Realizar simulações numéricas para ajudar a compreender a propagação das ondas ultrassônicas em elementos de concreto emitidas tanto pelo método de transmissão direta quanto pelo método de transmissão indireta. Também realizar simulações que representem o efeito acustoelástico em elementos de concreto. Estas simulações, além de ajudar a compreender o fenômeno da acustoelasticidade, também poderiam ser utilizadas para estudos paramétricos, que, se fossem realizados experimentalmente, demandariam muito tempo.

REFERÊNCIAS

ABO-QUDAIS, S.A, Efect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. **Construction and Building Materials**. v. 19, p. 257-263, 2005.

AGGELIS, D.G. et al. Elastic wave simulation in ground anchors for the estimation of pre-stress. **Tunnelling and underground space technology**, v. 30, p. 55-63, 2012.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.2R-98**: Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. Farmington Hills, MI, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 597-02**: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken, PA, 2003.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**. 2016. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/apostila_us_2016.pdf> Acesso em: 05 out. 2017.

ANH VU, Q. et al. Concrete cover characterisation using dynamic acousto-elastic testing and Rayleigh waves. **Construction and Building Materials**. v. 114, p.87-97, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido- Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

BATE, P. et al. Application of laser-ultrasonics to texture measurements in metal processing. *Acta Materialia*. V. 123, p. 329-336, 2017.

BENAICHA, M. et al. Prediction of Self-Compacting Concrete homogeneity by ultrasonic velocity. **Alexandria Engineering Journal**. v.54, p. 1181-1191, 2015.

BENMEDDOUR, F. et al. Development of an ultrasonic experimental device to characterize concrete for structural repair. **Construction and Building Materials**. v.37, p.934-942, 2012.

BOMPAN, K.F.; HAACH, V.G. Ultrasonic tests in the evaluation of the stress level in concrete prisms based on the acoustoelasticity. **Construction and Building Materials**. V. 162, p.740-750, 2018.

BRAY, D.E.; TANG, W. Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the L_{CR} ultrasonic wave. **Nuclear Engineering and Design**. v.207, p.231-240, 2021.

BRITISH STANDARD. **BS:1881:203**: Recommendations for measurement of melocity of ultrasonic pulses in concrete. Londres, 1986.

BUI, D. et al. Evaluation of Concrete Distributed Cracks by Ultrasonic Travel Time Shift Under an External Mechanical Perturbation: Study of Indirect and Semi-direct Transmission Configurations. **Journal of Nondestructive Evaluation**.v.32.p.25-36, 2013.

CARRAZEDO, Ricardo et al. Mechanical Characterization of Concrete by Impact Acoustics Tests. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 4, p. 05018001, 2018.

CARRIÓN, A. et al. Ultrasonic signal modality: A novel approach for concrete damage evaluation. *Cement and Concrete Research*. v. 101, p. 25-32, 2017.

CASTELLANO, A. et al. Some advancements in the ultrasonic evaluation of initial stress states by the analysis of the acoustoelastic effect. **Procedia Engineering**. v. 199, p. 1519-1526, 2017.

CAVUTO, A. et al. Train wheel diagnostics by laser ultrasonics. **Measurements**. C. 80, p. 99-107, 2016.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990**. Thomas Telford Services Ltd., Londres, 1993.

CHAI, H. K. et al. Single-side access tomography for evaluating interior defect of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 2411-2418, 2010.

CHAKI, S.; BOURSE, G. Stress level measurement in prestressed steel strands using acoustoelastic effect. **Experimental mechanics**, v.49, p.673-681, 2009.

CRECRAFT, D. I. The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves. *Journal of Sound and Vibration*. v.5, p. 173-192, 1967.

DUBUC, B.; EBRAHIMKHANLOU, A., SALAMONE, S. Higher order longitudinal guided wave modes in axially stressed seven-wire strands, **Ultrasonics**, v 84, 2017, p. 382-391.

EGLE, D. M.; BRAY, D. E. Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel. **The Journal of the Acoustical Society of America**. v. 60, p. 741 - 744, 1976.

FERREIRA, G.C.S.; FAVARIN, L.G.A; MACEDO, G. Elastic Constants of Grout by Ultrasound. **International Journal of Engineering and Technology**. v.7,p.357-360, 2015.

GARNIER, V. et al. Acoustic techniques for concrete evaluation: Improvements, comparisons and consistency. **Construction and Building Materials**. v.43, p.597-613, 2013.

GERCINDO, F. **Estudo sobre fatores influentes nos resultados de ensaios não destrutivos em concreto endurecido**. Urbelândia, 2011.

GRÊT, A.; SNIEDER, R.; OZBAY, U.. “Monitoring in situ stress changes in a mining environment with coda wave interferometry”. *Geophysical Journal International*, 167, p.504-508, 2006.

GRÊT, A.; SNIEDER, R.; SCALES, J.. “Time-lapse monitoring of rock properties with coda wave interferometry”. **Journal of Geophysical Research**, v.111, p.1-11, 2006.

HAACH, V.; JULIANI, L.; RAVANINI, M.. Ultrasonic evaluation of mechanical properties of concretes produced with high early strength cement". *Construction and Building Materials*, 96, 2015, p. 1-10.

HAACH, V.; RAMIREZ, F.. Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography. **Construction and Building Materials**. v 119, p. 61-70, 2016.

HE, J. et al. Absolute stress field measurement in structural steel members using the Lcr wave method, **Measurement**, v 122, p. 679-687, 2018.

HUGHES, D.S.; KELLY, J.L. Second-order elastic deformation of solids. **Physical Review**. v.92, p.1145-1149, 1953.

HWANG, E. et al. Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity. **Construction and Building Materials**. v 171 p. 511-520, 2018.

JAVADI, T. et al. Taguchi optimization and ultrasonic measurement of residual stresses in the friction stir welding. **Materials and Design**. v. 55, p. 27-34, 2014.

KAMYSHEV, A.V.; NIKITINA, N.E.; SMIRNOV, V.A. Measurement of the residual stresses in the treads of railway wheels by the acoustoelasticity method. **Russian journal of nondestructive testing**, v.46, n.3, p.189-193, 2010.

KARABUTOV, A. et al. Laser ultrasonic diagnostics of residual stress. **Ultrasonics**. v.48, p. 631-635, 2008.

KLEITSA, D. et al. Assessment of metal strand wire pre-stress in anchor head by ultrasonics. **NDT&E Internacional**, v. 43, p.547-554, 2010.

KRAUTKRAMER, J.; KRAUTKRAMER, H. **Ultrasonic testing of materials**. 4.ed. Berlin: Springer, 1990.

KUMAR, S. Assessing quality of diffusion bonded joints with interlayer using ultrasonic/ultrasound. **Journal of Materials Processing Technology**. V.

LAROSE, E.; HALL, S. Monitoring stress related velocity variation in concrete with a $2 \cdot 10^{-5}$ relative resolution using diffuse ultrasound. **The journal of the Acoustical Society of America**. v.125, p. 1-4, 2009.

LEE, C.; ASCE, A. M.; HEMIER, G. A. Model of FRP-Confined Concrete cylinders in axial compression. **Journal of Composites for Construction**. v. 13, p.442-454, 2009.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. L. **Mechanics of solid materials**. 1 ed. Nova York: Cambridge University Press, 1994.

LILLAMAND, I. et al. Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading. **NDT&E Internacional**, v. 43, p.655-660, 2010.

Liu, H. et al. Influence factors analysis and accuracy improvement for stress measurement using ultrasonic longitudinal critically refracted (LCR) wave. **Applied Acoustics**. v.141,p.178-187, 2018.

LIU, S. et al. Monitoring setting and hardening process of mortar and concrete using ultrasonic shear waves. **Construction and Building Materials**. v. 72, p.248-255, 2014.

MALHOTA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2 ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MORADI-MARANI, F. et al. Evaluating the damage in reinforced concrete slabs under bending test with the energy of ultrasonic waves. **Construction and Building Materials**. v. 73, p. 663-673, 2014.

MURNAGHAN, F. D. **Finite deformation of an elastic solid**. Nova York: John Wiley and Sons, Inc., 1951.

NAFFA, S. O. et al. Detection of chemical damage in concrete using ultrasound. **Ultrasonics**. v.40, p.247 – 251, 2002.

NARAYANAN, A.; KOCHERLA, A.; SUBRAMANIAM, K.V.L. Damage detection in concrete using surface mounted PZT transducer. **Materials Today: Proceedings**. v.28, p.925-930, 2020.

NOGUEIRA, C.L. The influence of Concrete Nonlinear Elastic Behavior under Tensile Stresses on Longitudinal and Shear Ultrasonic Pulse Propagation. **Russian Journal of Noundestructive Testing**. v.55,p.918-927, 2019.

ODILE, A. et al. Following Stress Level Modification of Real Size Concrete Structures with Coda Wave Interferometry (cwi). **AIP Conference Proceedings**. v.1335, 1291, 2011.

OGDEN, R.W., **Non-linear Elastic Deformation**. Ellis Horwood. Chichester, England, 1984.

ORTEGA, L.P.C et al. **Introdução à avaliação de tensões por ultrassom**. 1 ed. Rio de Janeiro: Virtual Científica, 2011.

PAYAN, C; GARNIER, V.; MOYSAN, J. Determination of third elastic constants in a complex solid applying coda wave interferometry. **Applied Physics Letters**. v. 94, p. 011904-1 – 011904 – 3, 2009.

PLANÈS, T.; LAROSE, E. A review of ultrasonic coda wave interferometry in concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 53, p. 248 – 255, 2013.

POPOVICS, J.S. NDE techniques for concrete and masonry structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v.5, p.49-59, 2003.

POPOVICS, S.; POPOVICS, J. S.. Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete. **Materials and Structures**, v.24, p.15-23, 1991.

RESENDE, R.M.L.G.. Avaliação dos efeitos da danificação e da acustoelasticidade sobre a velocidade de pulso ultrassônico em elementos de concreto. 2018. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SANTOS, A.A. et al. Application of Lcr Waves to Evaluate Residual Stresses in the RIM of Railroad Forged Wheels. **Journal of Nondestructive Evaluation**. v.28, p.91-100, 2009.

SAINT-PIERRE, F. et al. Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. *Construction and Building Materials*. V. 125, p. 1022-1027, 2016.

SOUZA, F.C.; PINTO, R.C.A. Ultrasonic investigation on the effectiveness of crack repair in concrete. **IBRACON Structures and Materials Journal**. v.13, p.1-10, 2020.

SCHIAVON, K. F B.. **Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de concreto**. São Carlos, 2015.

SHAH, A. A.; RIBAKOV, Y.; HIROSE, S. Nondestructive evaluation of damage concrete using nonlinear ultrasonics. **Material and Design**. v. 30, p. 775-782, 2009.

SCHIAVON, K.F.B. Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de concreto. 2015. 130p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SNIEDER, R.; GRÊT, A.; DOUMA, H.; SCALES, J.. “Coda Wave Interferometry for estimating nonlinear behavior in Seismic Velocity”. *Science*, 295, p.2253-2255,2002.

SPALVIER, A. et. al. The stress-induced surface wave velocity variations in concrete. **AIP Conference Proceedings**. v.36 ,p. 1-8, 2017.

SPOESLSTRA, M. R.; MONTI, G. FRP-confined concrete model. **Journal of Composites for Construction**. v.3, p.143-150, 1999.

STAHLER, S. C; SENS-SCHONFELDER, C. Monitoring stress changes in a concrete bridge with coda wave interferometry. **Acoustical Society of America**. v.129, p.1945-1952, 2011.

TIMOSHENKO, S.P.; GOODIER, J. N. **Teoria da elasticidade**. 3 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

TROFIMOV, A. I.; MININ, S. I.; TROFIMOV, M. A. Measurement of the stressed state of welded joints in the NPP process components and circulation pipelines based on acoustoelasticity theory. **Nuclear Energy and Technology**. v. 2, p. 219-222, 2016.

UZUN, F.; BILGE, A. N. Immersion ultrasonic technique for investigation of total welding residual stress. **Procedia Engineering**. v. 10, p. 3098-3103, 2011.

WHITEHURST, E.A. Evaluation of concrete properties from sonic tests. American Concrete Institute. Monografia. No. 2. Detroit, 1966.

WOLF, F.; PIRSKAWETZ, S.; ZANG, A. Detection of crack propagation in concrete with embedded ultrasonic sensors. **Engineerin Fracture Mechanics**. V. 146, p.146-171, 2015.

ZACCARELLI, L.; PANDOLFI, D.; BIANCO, F.; SACCOROTTI, G.; BEAN, C. J.; DEL PEZZO E. "Temporal changes in seismic wave propagation towards the end of the 2002 Mt Etna eruption". *Geophysical Journal International*, 178, p.1779-1788, 2009.

ZHAN, Y. et al. Experiment and numerical simulation for laser ultrasonic measurement of residual stress. **Ultrasonics**. v. 73, p. 271-276, 2017.

ZHANG, J. et al. Monitoring setting and hardening of concrete by active acoustic method: effects of water-to-cement ratio and pozzolanic materials. **Construction and Building Materials**. v.88, p.118-125, 2015.

ZHANG, Y. et al. Nonlinear coda wave interferometry for the global evaluation of damage levels in complex solids. *Ultrasonics*. v.73, p. 245-252, 2017.

ZHANG, Y. Study of stress-induced velocity variation in concrete under direct tensile force and monitoring of the damage level by using thermally-compensated Coda Wave Interferometry. **Ultrasonics**. V. 52, P. 1038-1045, 2012

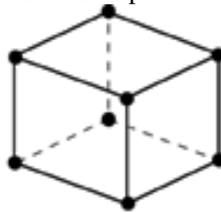
APÊNDICE

Apêndice A - Simulação numérica

A simulação numérica foi realizada para obter a distribuição de tensões no caminho de propagação das ondas ultrassônicas quando emitidas por meio do método de transmissão indireta e direta. Deste modo, o modelo numérico foi gerado para o prisma de concreto contendo acima e abaixo dele as peças de aço em U.

A simulação foi realizada usando o Abaqus®, versão 6.14, um software de elementos finitos. O modelo numérico foi desenvolvido com o elemento linear prismático C3D8R (figura.A.1) que apresenta 8 nós. As arestas do elemento finito apresentaram comprimento de 5 mm. A tabela A.1 mostra as propriedades elásticas atribuídas ao concreto e ao aço no modelo numérico. A simulação apresentada foi realizada para o prisma C1P1.

Figura A. 1– Elemento linear prismático C3D8R com 8 nós.



Fonte: Abaqus, V. (2014). 6.14 Documentation. Dassault Systemes Simulia Corporation, 651, 6-2.

Tabela A.1–Propriedades elásticas do concreto e do aço.

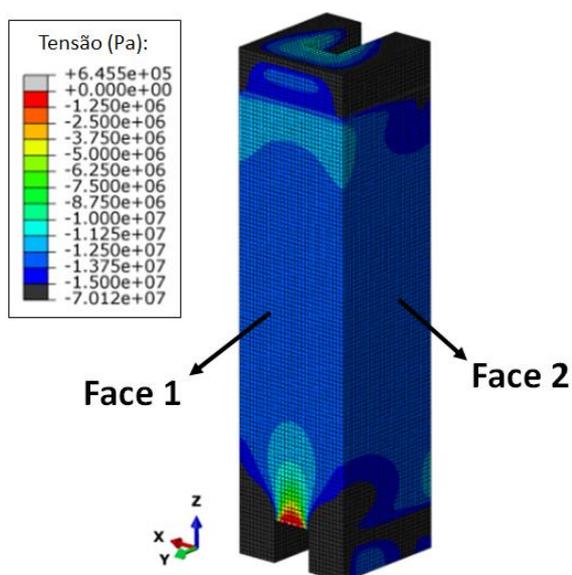
Material	E (Gpa)	v
Concreto	28	0.2
Aço	210	0.3

Fonte: Autor.

Foi aplicado deslocamento vertical de 0.242 mm em toda a face inferior da peça de aço localizada abaixo do prisma e a face superior da peça de aço foi engastada. Este valor de deslocamento gerou tensões de 13.3 MPa na região central do prisma, onde as tensões já estão uniformizadas. O valor de 13.3 MPa foi o valor máximo de tensão aplicado nos prismas do concreto C1. A figura A.2 mostra a distribuição de tensões obtidas no prisma do modelo numérico. A face 1 é aquela onde os transdutores foram posicionados pelo arranjo de transmissão indireta e a face 2 é a face adjacente à face 1. As figuras A3a, A4a e A5a mostram a distribuição de tensões em 3 faces do prisma: face 1, que é a face lateral onde os transdutores foram posicionados pelo método de transmissão indireta e cuja linha central (linha vermelha)

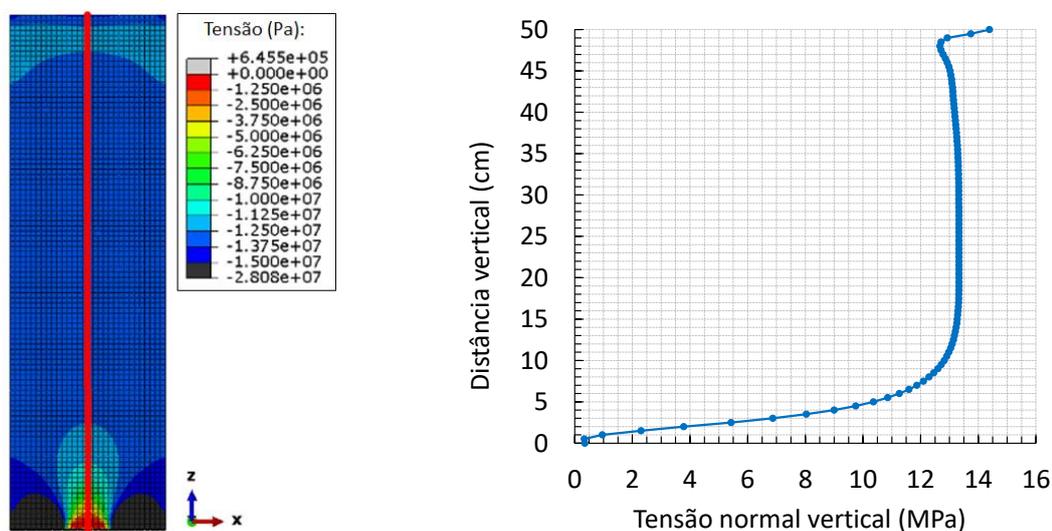
foi o caminho de propagação das ondas emitidas por este método; face 2, que é a face adjacente à face 1 e face 3, que é a face do centro do prisma, cuja linha central (linha vermelha) foi o caminho de propagação das ondas quando os transdutores foram posicionados nas faces de extremidade pelo método direto. As linhas vermelhas foram desenhadas nestas figuras para indicar o percurso das ondas. As figuras A3b, A4b e A5c mostram os gráficos da distribuição de tensões verticais ao longo da linha vertical (linha vermelha) no centro das faces 1, 2 e 3 respectivamente.

Figura A.2- Distribuição das tensões normais verticais no prisma.



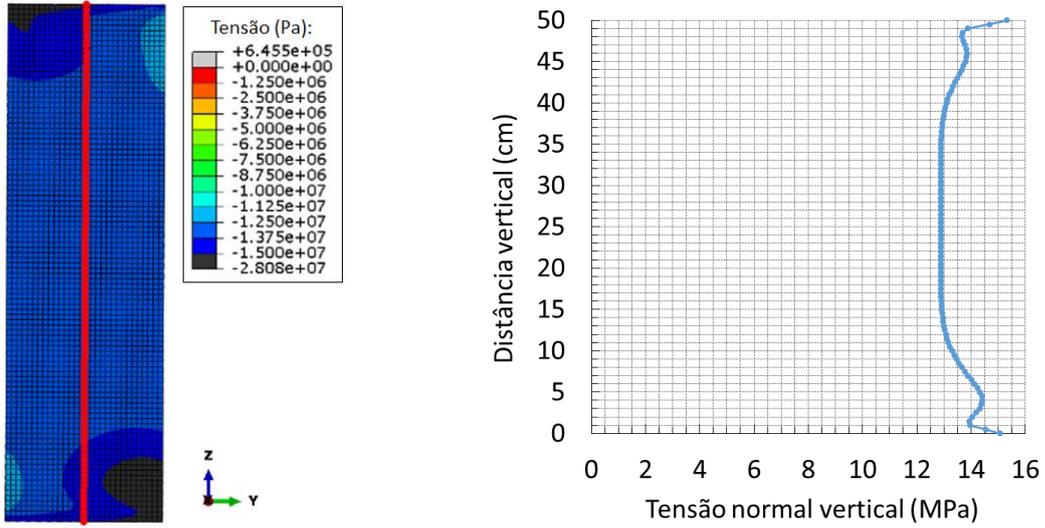
Fonte: Autor.

Figura A.3- Face 1: (a) Distribuição das tensões normais na face 1 e (b) Tensões normais verticais de compressão ao longo da linha vermelha quando a carga máxima foi aplicada no prisma C1P1.



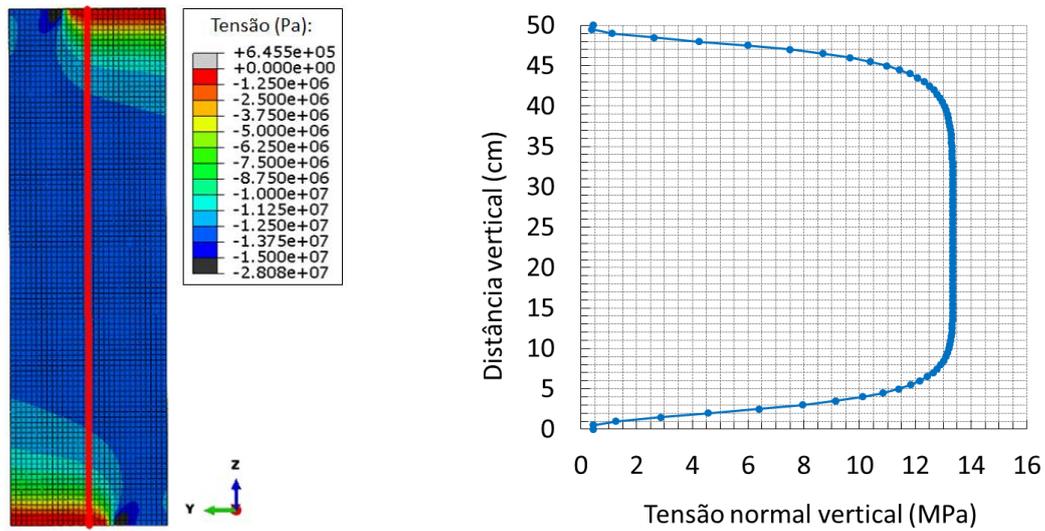
Fonte: Autor.

Figura A.4- Face 2: (a) Distribuição das tensões normais na face 2 e (b) Tensões normais verticais de compressão ao longo da linha vermelha quando a carga máxima foi aplicada no prisma C1P1.



Fonte: Autor.

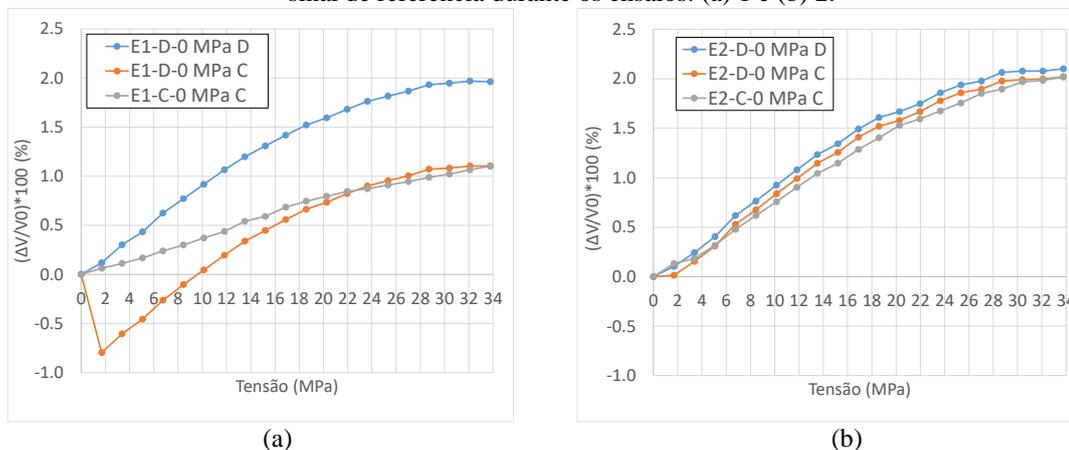
Figura A.5- Face 3: (a) Distribuição das tensões normais na face 3 e (b) Tensões normais verticais de compressão ao longo da linha vermelha quando a carga máxima foi aplicada no prisma C1P1.



Fonte: Autor.

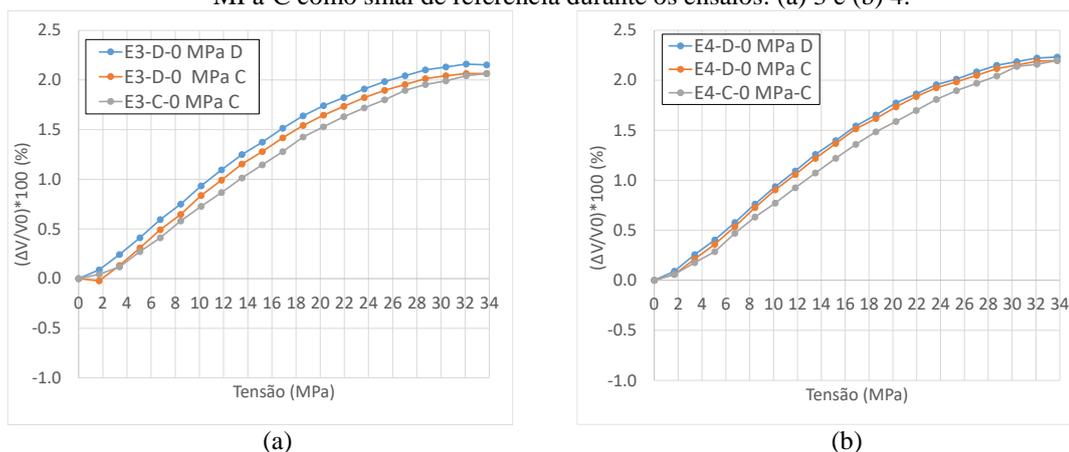
Apêndice B

Figura B. 1-Variação relativa da velocidade das ondas OL₁₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 1 e (b) 2.



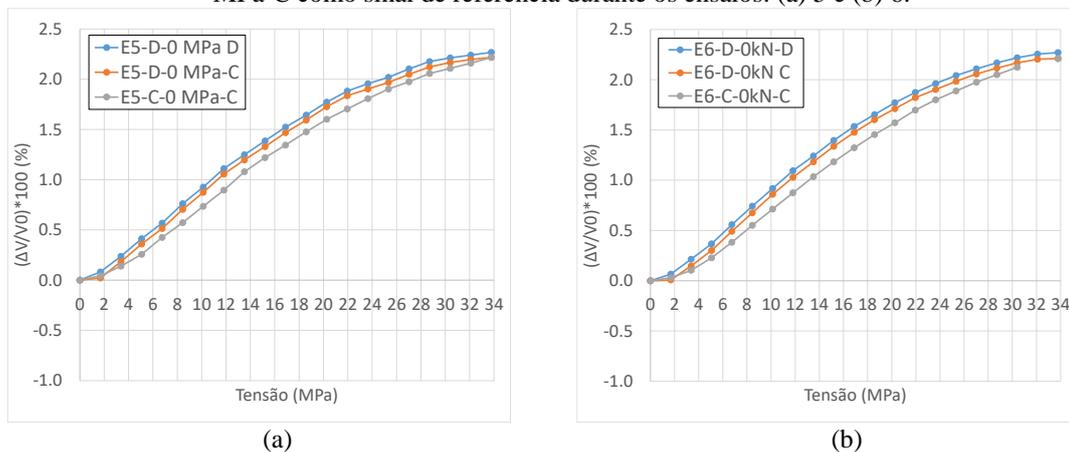
Fonte: Autor.

Figura B. 2 - Variação relativa da velocidade das ondas OL₁₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 3 e (b) 4.



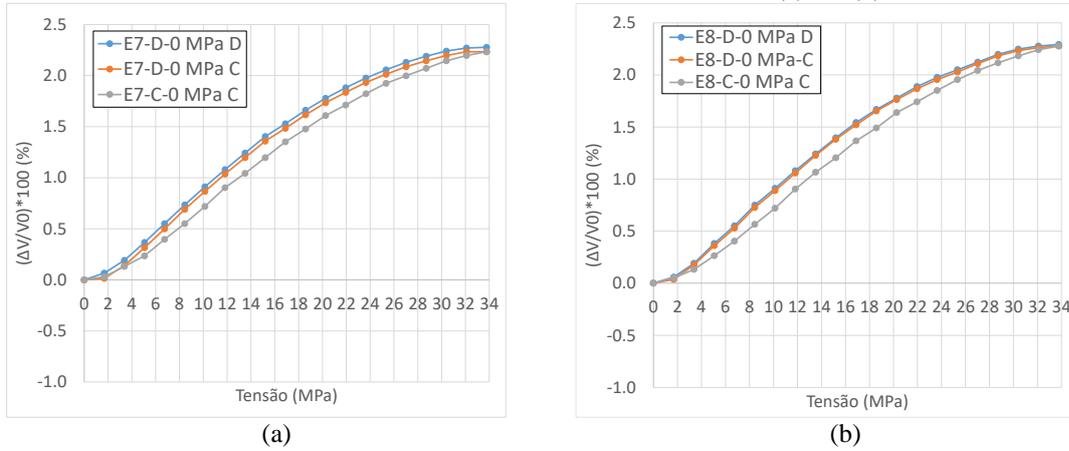
Fonte: Autor.

Figura B. 3 - Variação relativa da velocidade das ondas OL₁₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 5 e (b) 6.



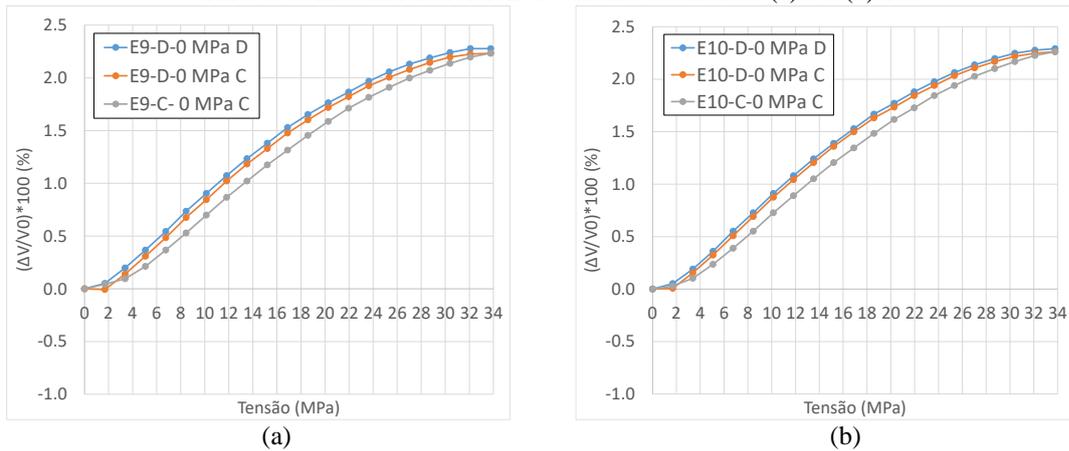
Fonte: Autor.

Figura B. 4 - Variação relativa da velocidade das ondas OL₁₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 7 e (b) 8.



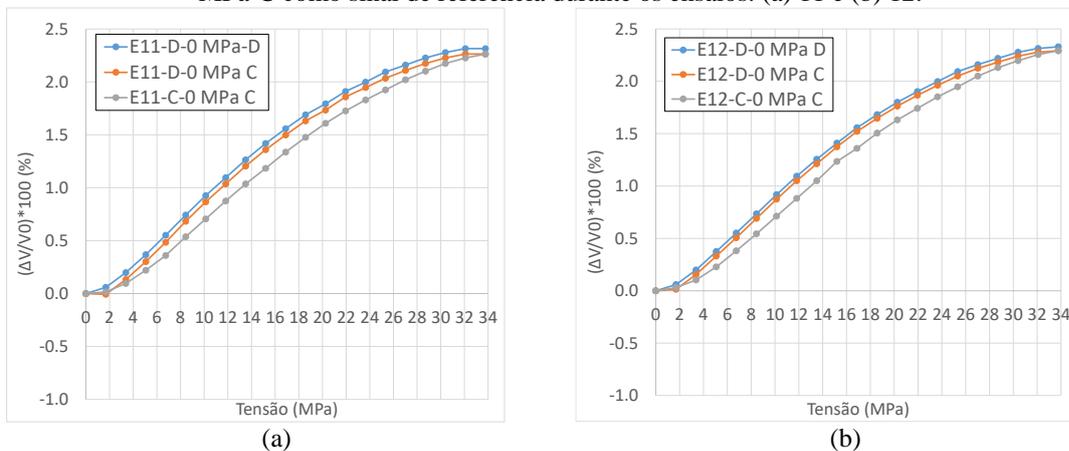
Fonte: Autor.

Figura B. 5 - Variação relativa da velocidade das ondas OL₁₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 9 e (b) 10.



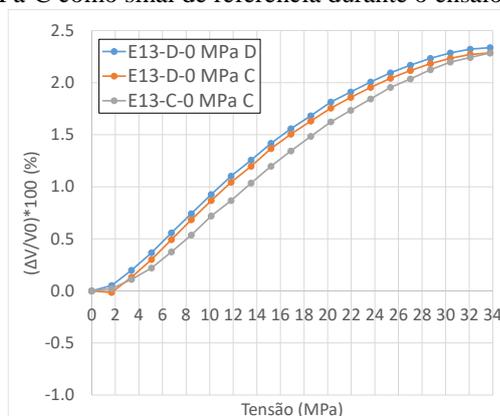
Fonte: Autor.

Figura B. 6 - Variação relativa da velocidade das ondas OL₁₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 11 e (b) 12.



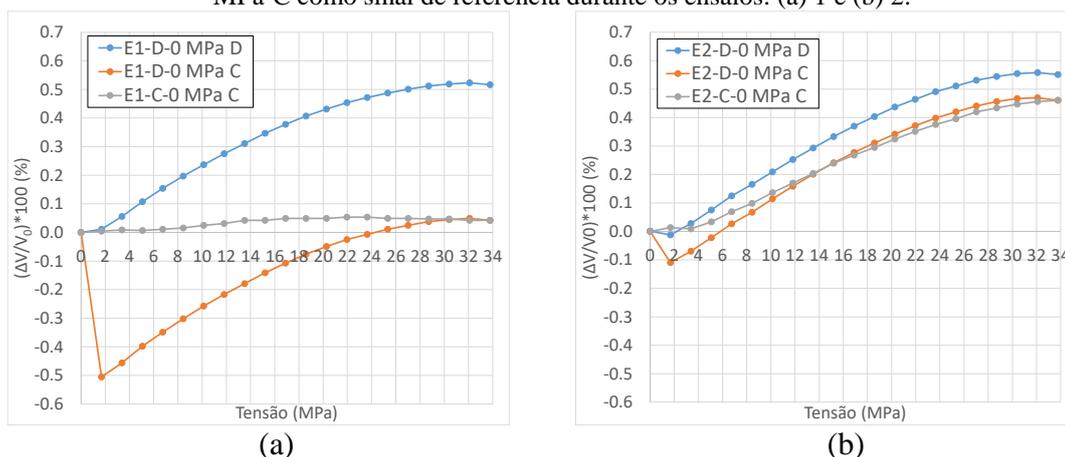
Fonte: Autor.

Figura B. 7 - Variação relativa da velocidade das ondas OL_{11} em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante o ensaio 13.



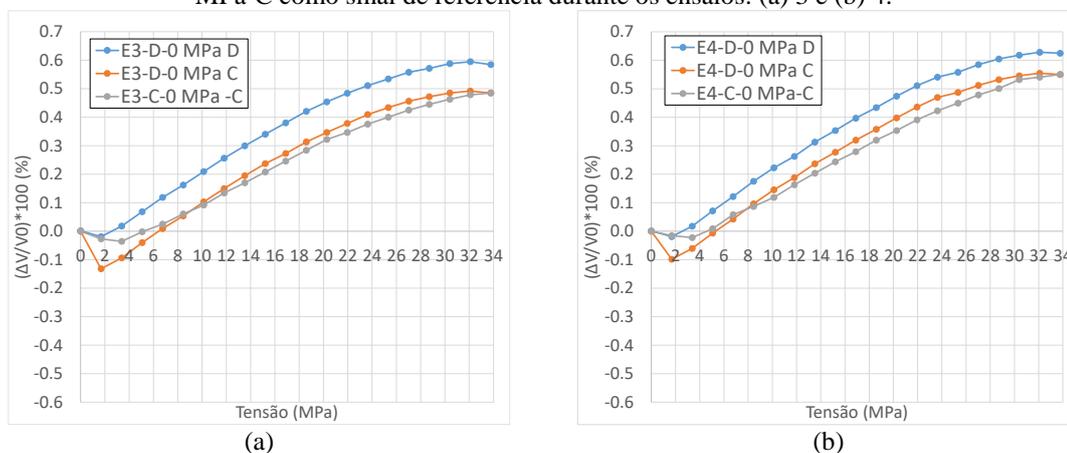
Fonte: Autor

Figura B. 8 - Variação relativa da velocidade das ondas OC_{12} em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 1 e (b) 2.



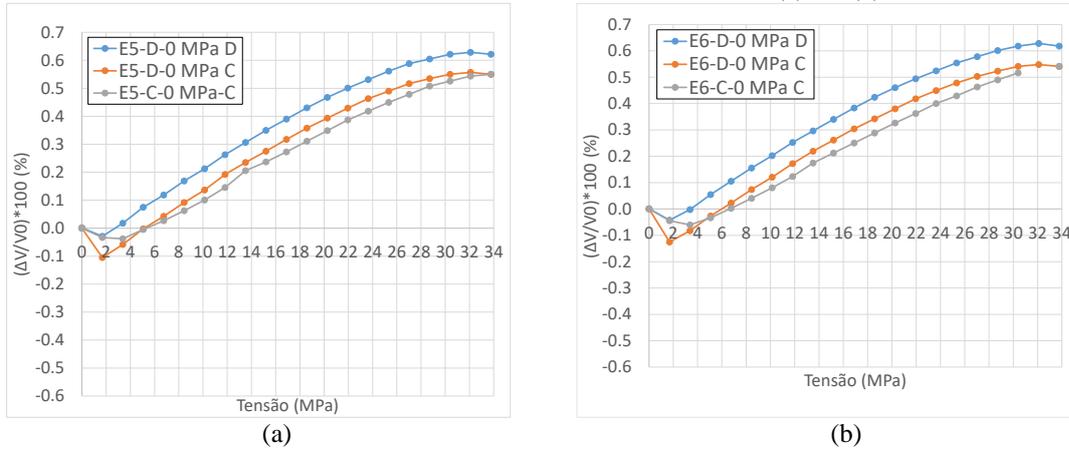
Fonte: Autor.

Figura B. 9 - Variação relativa da velocidade das ondas OC_{12} em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 3 e (b) 4.



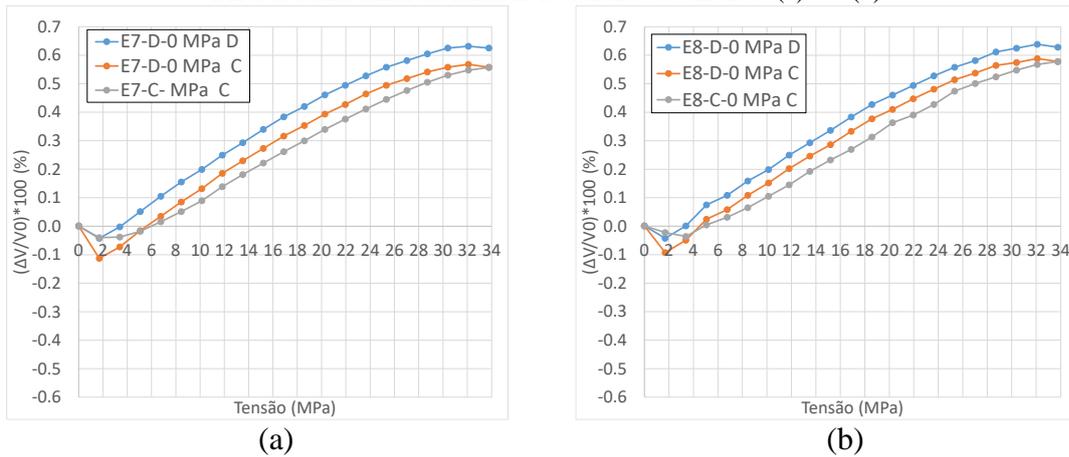
Fonte: Autor

Figura B. 10 - Variação relativa da velocidade das ondas OC₁₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 5 e (b) 6.



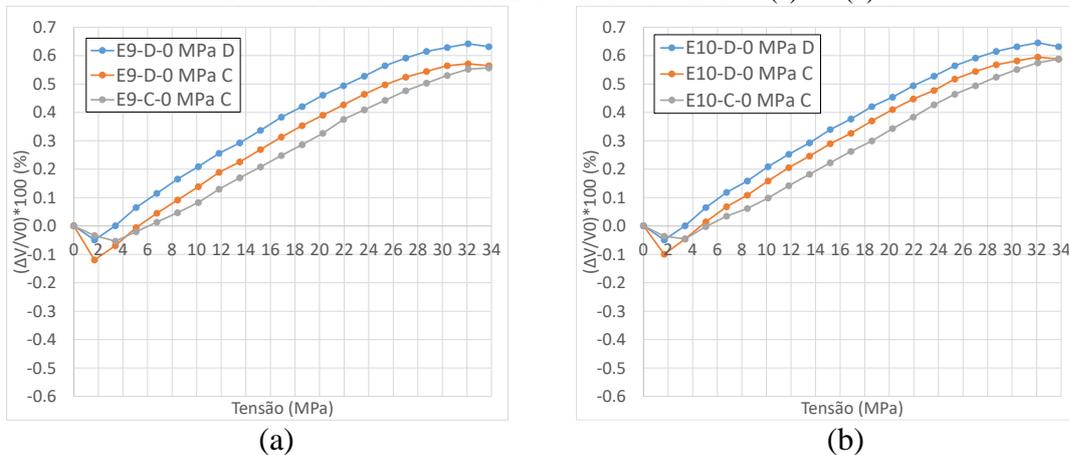
Fonte: Autor.

Figura B. 11 - Variação relativa da velocidade das ondas OC₁₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 7 e (b) 8.



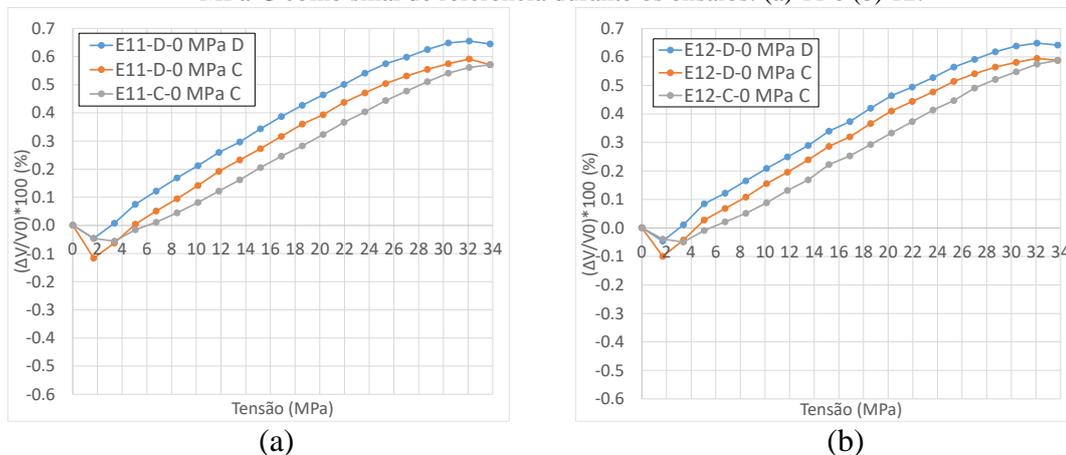
Fonte: Autor.

Figura B. 12 - Variação relativa da velocidade das ondas OC₁₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 9 e (b) 10.



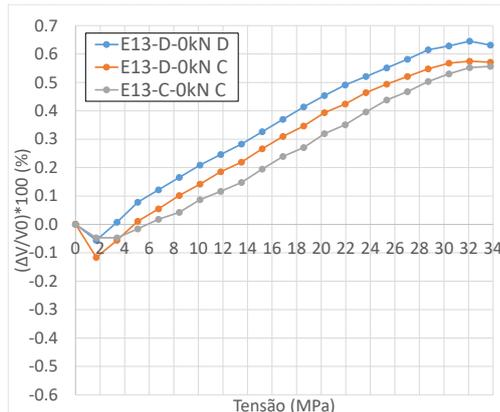
Fonte: Autor.

Figura B. 13 - Variação relativa da velocidade das ondas OC₁₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 11 e (b) 12.



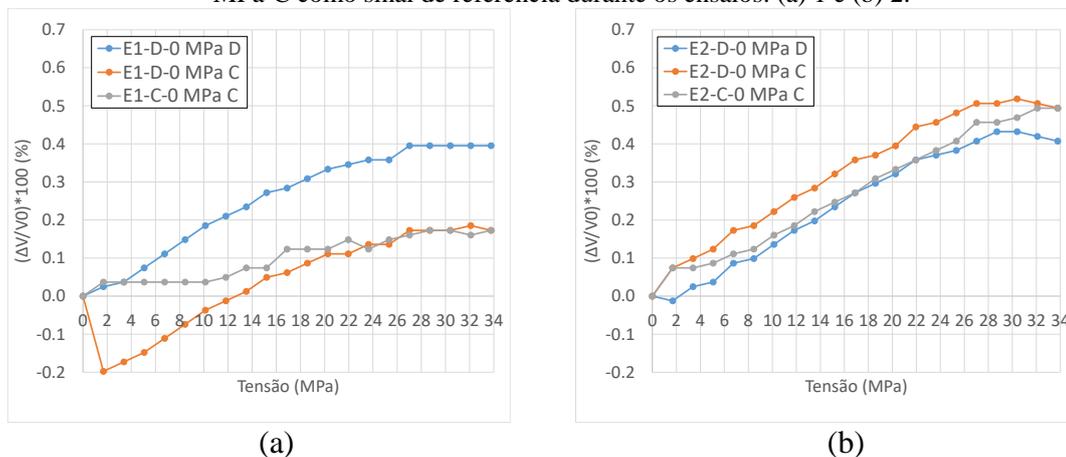
Fonte: Autor.

Figura B. 14 - Variação relativa da velocidade das ondas OC₁₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante o ensaio 13.



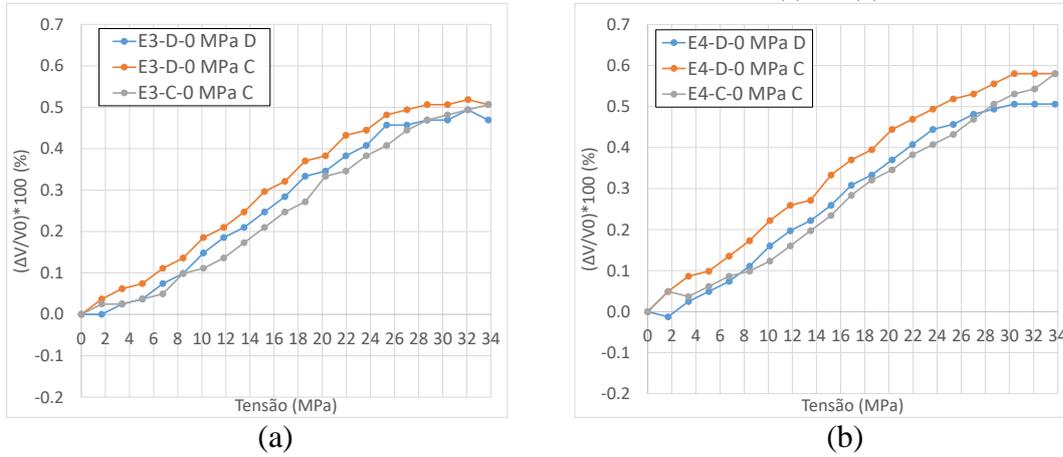
Fonte: Autor.

Figura B. 15 - Variação relativa da velocidade das ondas OL₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 1 e (b) 2.



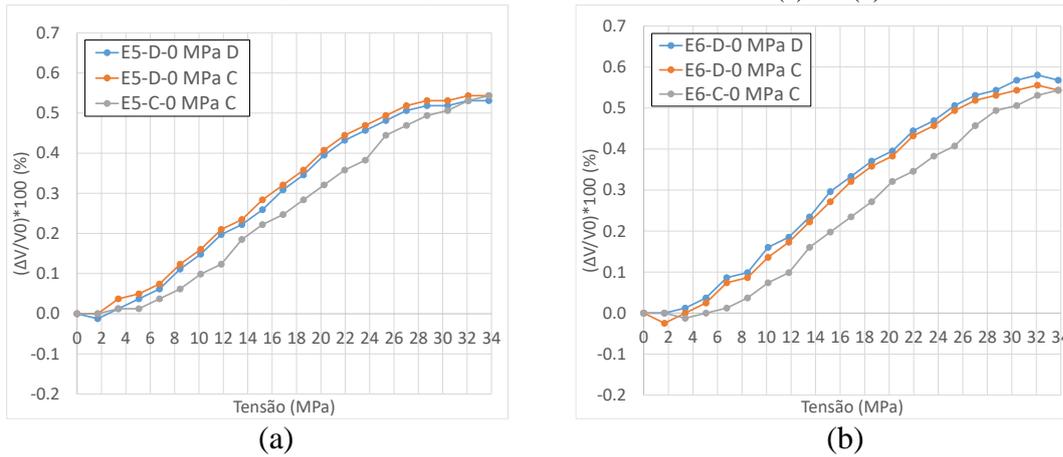
Fonte: Autor.

Figura B. 16 - Variação relativa da velocidade das ondas OL₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 3 e (b) 4.



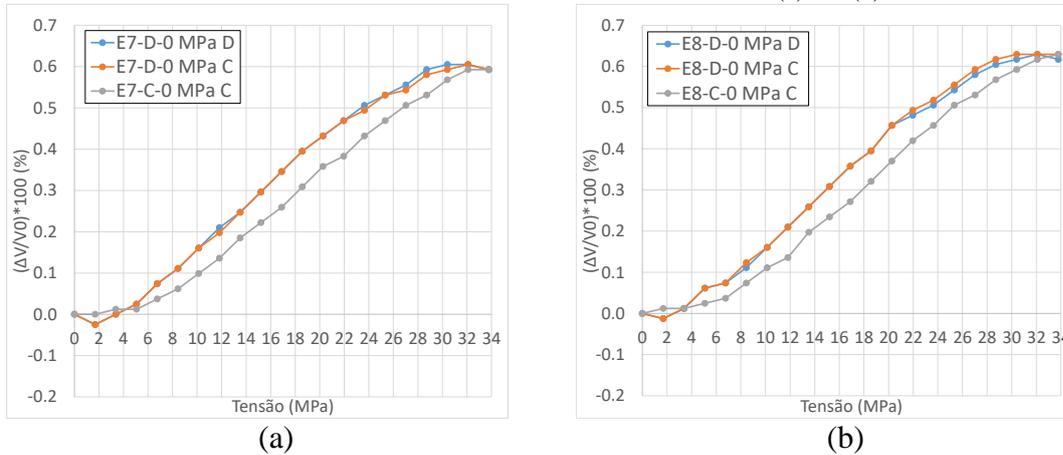
Fonte: Autor.

Figura B. 17 - Variação relativa da velocidade das ondas OL₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 5 e (b) 6.



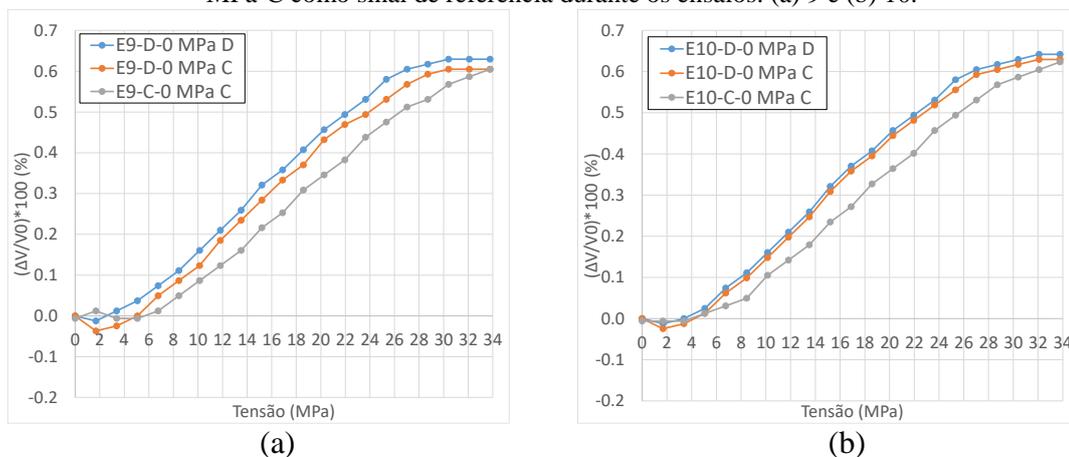
Fonte: Autor.

Figura B. 18 - Variação relativa da velocidade das ondas OL₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 7 e (b) 8.



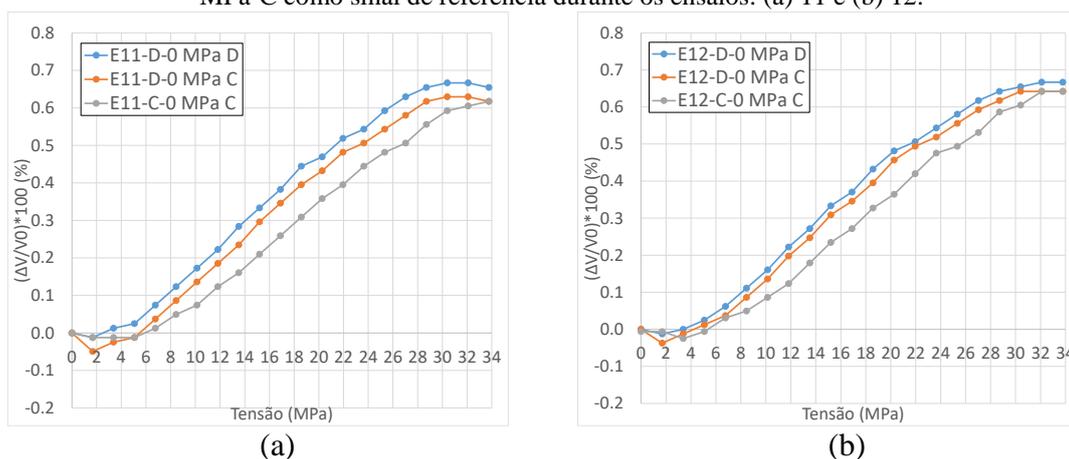
Fonte: Autor.

Figura B. 19 - Variação relativa da velocidade das ondas OL₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 9 e (b) 10.



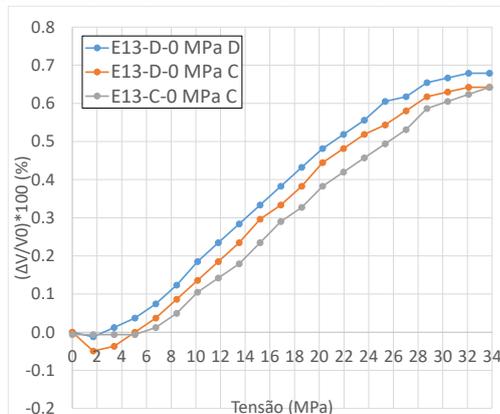
Fonte: Autor.

Figura B. 20 - Variação relativa da velocidade das ondas OL₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 11 e (b) 12.



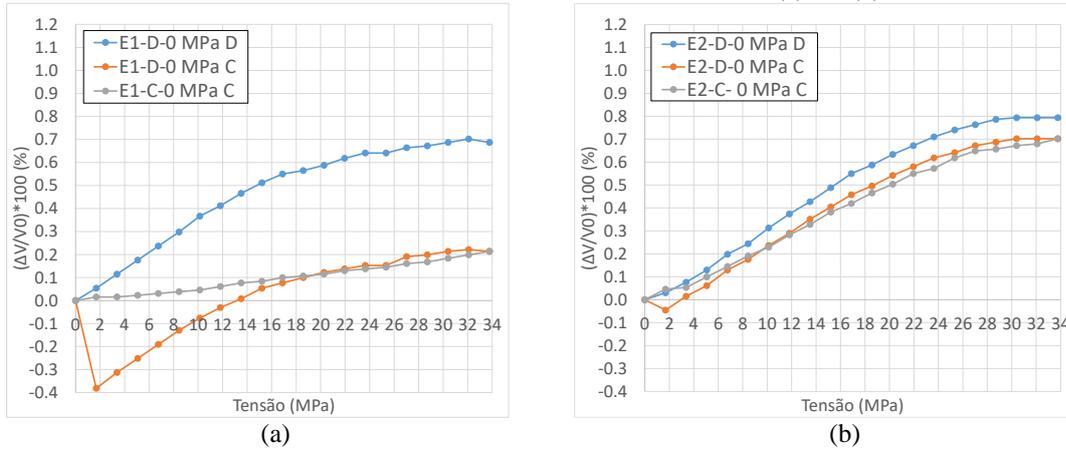
Fonte: Autor

Figura B. 21 - Variação relativa da velocidade das ondas OL₂₂ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante o ensaio 13.



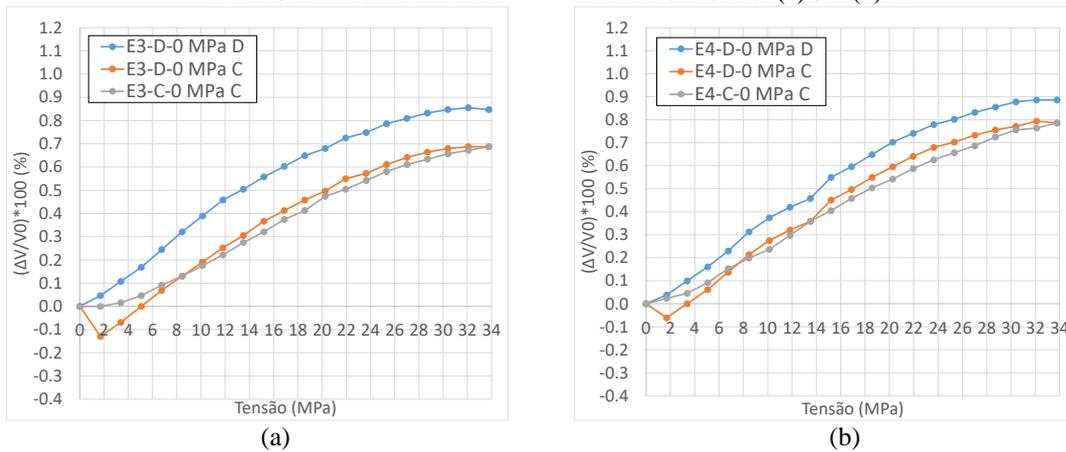
Fonte: Autor

Figura B. 22 - Variação relativa da velocidade das ondas OC₂₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 1 e (b) 2.



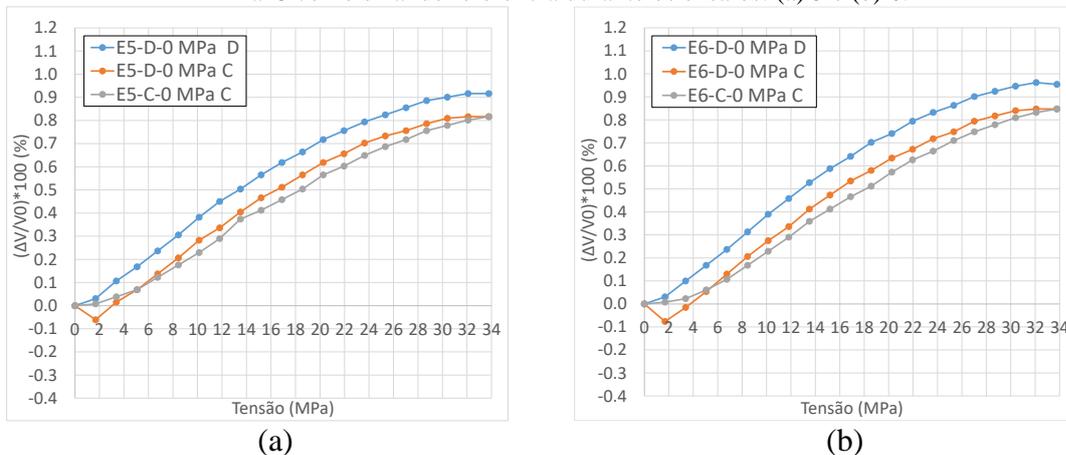
Fonte: Autor

Figura B. 23 - Variação relativa da velocidade das ondas OC₂₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 3 e (b) 4.



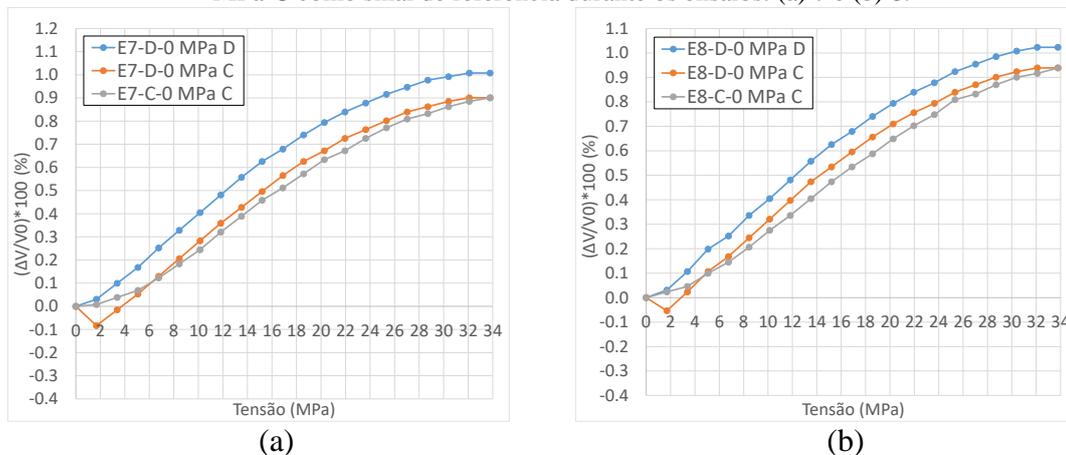
Fonte: Autor

Figura B. 24 - Variação relativa da velocidade das ondas OC₂₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 5 e (b) 6.



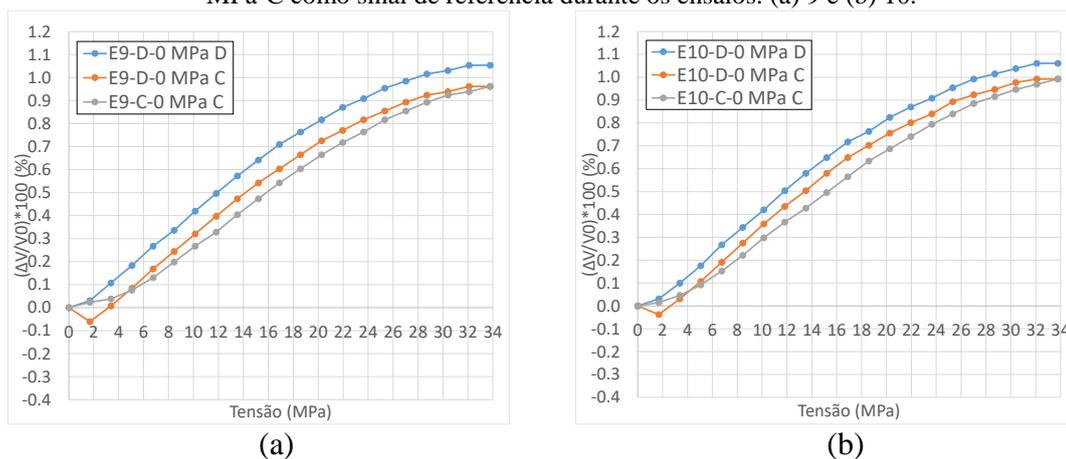
Fonte: Autor

Figura B. 25 - Variação relativa da velocidade das ondas OC₂₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 7 e (b) 8.



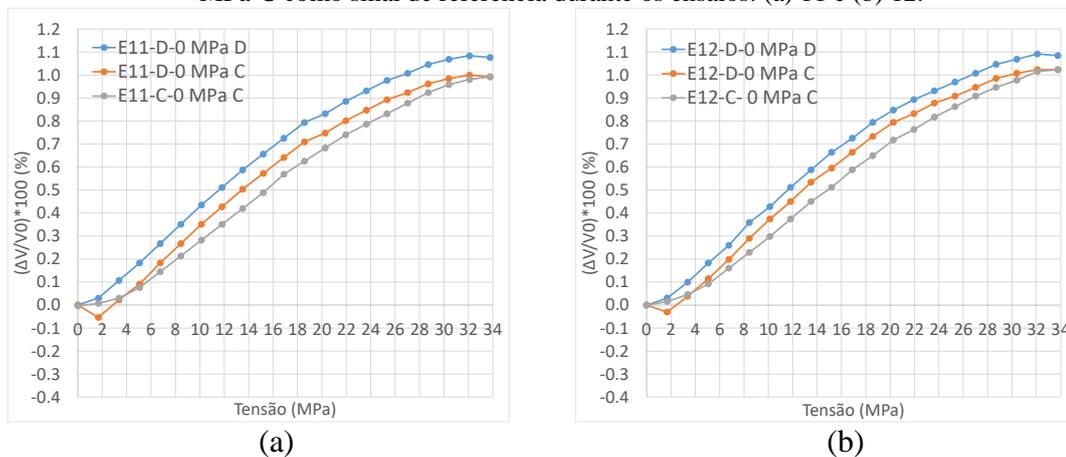
Fonte: Autor

Figura B. 26 - Variação relativa da velocidade das ondas OC₂₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 9 e (b) 10.



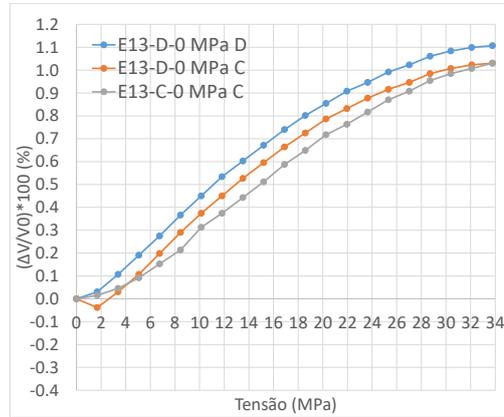
Fonte: Autor

Figura B. 27 - Variação relativa da velocidade das ondas OC₂₁ em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante os ensaios: (a) 11 e (b) 12.



Fonte: Autor

Figura B. 28 - Variação relativa da velocidade das ondas OC_{21} em função da tensão para a fase de descarregamento usando 0 MPa-C e 0 MPa-D como sinais de referência e para a fase de carregamento usando 0 MPa-C como sinal de referência durante o ensaio 13.



Fonte: Autor