

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

KAREN FERNANDA BOMPAN SCHIAVON

**Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de
concreto**

São Carlos
2015

KAREN FERNANDA BOMPAN SCHIAVON

**Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de
concreto**

VERSÃO CORRIGIDA

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

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Civil (Estruturas).

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Guilherme Haach.

São Carlos
2015

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.

S329e Schiavon, Karen Fernanda Bompan
Estudo da aplicação de ultrassom na medição de
tensões em estruturas de concreto / Karen Fernanda
Bompan Schiavon; orientador Vladimir Guilherme Haach.
São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Estruturas -- Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Medição de tensões. 2. Acustoelasticidade. 3.
Ondas ultrassônicas. 4. Ensaio não destrutivo. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **KAREN FERNANDA BOMPAN SCHIAVON**.

Título da dissertação: "Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de concreto."

Data da defesa: 22/06/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Vladimir Guilherme Haach (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Associado **José Ricardo Tarpani**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **Roberto Caldas de Andrade Pinto**
(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):
Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar o meu caminho e me guiar em todos os momentos.

Ao meu amado companheiro, José Antonio Schiavon (Nene), pelo carinho, amor, compreensão, paciência, grande incentivo e companheirismo em todos os momentos, estando perto ou longe. Apoio fundamental durante toda a caminhada.

Aos meus queridos pais, Bárbara e Luiz, grandes exemplos na minha vida. Todo o amor, confiança depositada em mim, apoio e incentivo aos estudos foram fundamentais na conclusão de mais uma etapa na minha jornada. Obrigada.

Aos meus irmãos, Karina e Bruno, grandes amigos e parceiros na minha vida, por todo o amor e apoio.

Aos meus queridos avós Eduarda e Aristides e a toda a minha família.

Ao professor e orientador Vladimir G. Haach, pela atenção, paciência e disponibilidade constante ao longo de todo o trabalho.

Aos demais professores que por meio dos conhecimentos transmitidos auxiliaram na minha formação.

Aos funcionários do laboratório de estruturas pela ajuda durante os ensaios experimentais.

Aos colegas Ana, Jackson, Lara, Geovanne, Sérgio, Fernando, Giovanni, Ayrton, Camila, Barretos, Daniel, Thaís, Matheus, Hugo, Henrique, Caio e demais colegas do departamento pela ajuda e companheirismo durante o curso.

Aos funcionários da secretaria do SET, sempre dispostos a ajudar.

A CAPES, pela bolsa de mestrado concedida.

RESUMO

SCHIAVON, K. F. B. **Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de concreto**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Os ensaios não destrutivos visam avaliar um elemento sem gerar danos a ele com a técnica empregada. Um tipo de ensaio não destrutivo é o método da velocidade do pulso de ondas ultrassônicas. Este método é comumente utilizado para determinar propriedades elásticas de um dado material e verificar danos no interior dos elementos estudados. Outra aplicação do ultrassom é a medição do nível de tensão num material por meio da propagação das ondas ultrassônicas, tendo como base a teoria da acustoelasticidade. Entretanto, o uso do ultrassom para esta finalidade ainda é pouco difundido, principalmente na aplicação em estruturas de concreto. Este trabalho teve como objetivo estudar a possibilidade de medir tensões em estruturas de concreto com o uso do ultrassom. Para tanto, foram realizados ensaios de compressão uniaxial em prismas de concreto. Durante os ensaios, foram emitidas ondas ultrassônicas nos elementos para cada nível de tensão aplicada no material. A partir destes ensaios, foi feito um estudo do comportamento acustoelástico do concreto. Verificou-se que as velocidades das ondas ultrassônicas variaram em função da intensidade das tensões normais de compressão existentes nos corpos de prova. Com base na variação das velocidades, os coeficientes acustoelásticos do concreto de cada prisma foram determinados e relacionados com propriedades do concreto. Verificou-se a possibilidade de se estimar o nível mínimo de tensão em determinadas estruturas de concreto a partir do conhecimento de seus coeficientes acustoelásticos. Concluiu-se que é possível estimar tensões em estruturas de concreto utilizando o ultrassom.

Palavras-chave: Medição de tensões, acustoelasticidade, ondas ultrassônicas, ensaios não destrutivos.

ABSTRACT

SCHIAVON, K. F. B. **Study of application of ultrasound to measure stresses in concrete structures.** 2015. Dissertation (M. Sc. in Structural Engineering) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2015.

Nondestructive tests aim to analyze an element generating no damages. The pulse velocity of ultrasonic waves method is a type of nondestructive test. This method is commonly used to determine elastic properties of materials and to verify damages inside studied elements. Another application for ultrasound is the measurement of stress level in a material by means of propagation of ultrasonic waves. This application is based on the theory of acoustoelasticity. However, the use of ultrasound is still unusual for this purpose, mainly in application in concrete structures. This work intended to study the possibility of measuring stresses in concrete structures with the use of ultrasound. Uniaxial compression tests were performed on concrete prisms. During tests, ultrasonic waves were propagated in elements for each level of applied stress in the material. Then, a study about acoustoelastic behavior of concrete was performed. It was verified that the velocities of ultrasonic waves changed according to the intensity of normal compressive stresses there were in the specimens. Based on the variation of velocities, the acoustoelastic coefficients of concrete were determined for each prism. The coefficients were related with properties of concrete. The possibility of estimating the minimum level of stress in certain structures of concrete from their acoustoelastic coefficients was verified. It was concluded it is possible to estimate stresses in concrete structures using ultrasound.

Keywords: Measurement of stress, acoustoelasticity, ultrasonic waves, nondestructive tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Viga protendida.	24
Figura 1.2 - Cortina atirantada para contenção do solo.	24
Figura 2.1 - Esquema de ensaio do método da velocidade do pulso de ondas ultrassônicas. ...	33
Figura 2.2 - Frequências sonoras.	33
Figura 2.3 - Características das ondas.	34
Figura 2.4 - Onda longitudinal.	35
Figura 2.5 - Onda cisalhante.	36
Figura 2.6 - Onda Love.	36
Figura 2.7 - Onda Rayleigh.	36
Figura 2.8 - Equipamentos do ensaio de velocidade do pulso ultrassônico.	39
Figura 2.9 - Transdutor de ultrassom.	40
Figura 2.10 - Contração e expansão do cristal quando submetido à alta tensão alternada e emissão de pulsos elétricos pelo cristal quando submetido à vibrações mecânicas.	40
Figura 2.11 - Forma de onda de um pulso de ondas ultrassônicas recebido por um transdutor longitudinal receptor.	41
Figura 2.12 - Forma de onda de um pulso de ondas ultrassônicas recebido pelo transdutor de cisalhamento receptor.	42
Figura 2.13 - Tipos de arranjos de transdutores (E = emissor; R = receptor): (a) transmissão direta; (b) transmissão semidireta e (c) transmissão indireta.	43
Figura 2.14 - Esquema de configurações de medições acustoelásticas.	49
Figura 2.15 - Velocidade de ondas ultrassônicas num meio homogêneo e isotrópico submetido a uma tensão uniaxial na direção do eixo 1.	51
Figura 2.16 - Processo de medição e significado dos índices.	54
Figura 2.17 – Variação relativa da velocidade em função da tensão axial para as ondas longitudinais.	54
Figura 2.18 - Variação relativa da velocidade em função da tensão axial para as ondas de cisalhamento.	54

Figura 2.19 - Curvas da calibração acustoelástica durante o carregamento e descarregamento da cordoalha.	55
Figura 2.20 - Bloco de ancoragem: (a) visão global, (b) vista da placa de ancoragem.	56
Figura 2.21 - (a) cabeça de ancoragem com as cordoalhas e as cunhas, (b) cunhas, (c) posição dos transdutores para a medição.	57
Figura 2.22 - Modelo numérico de uma seção transversal da cabeça de ancoragem.	58
Figura 3.1 - Equipamento de ultrassom Pundit Lab ⁺	63
Figura 3.2 - Transdutores de cisalhamento com frequência de 250 kHz.	63
Figura 3.3 - Calibração do equipamento de ultrassom.	63
Figura 3.4 - Equipamento P3.	63
Figura 3.5 - (a) peça de aço com formato em U; (b) dimensões da peça de aço (medidas em cm).	64
Figura 3.6 - Aparato experimental com o prisma de concreto.	65
Figura 3.7 - Peça de isopor utilizada para fixar os transdutores na face superior e inferior do prisma.	65
Figura 3.8 - Peça de isopor mantendo o transdutor fixo na face superior do prisma.	65
Figura 3.9 - Peça de isopor mantendo o transdutor fixo na face inferior do prisma.	66
Figura 3.10 - Faixa de borracha utilizada para manter os transdutores fixos nas faces laterais do prisma.	66
Figura 3.11 - Nomenclatura de cada tipo de onda ultrassônica e suas ilustrações ao serem emitidas nas direções do eixo 1 e 2 do prisma durante o ensaio.	67
Figura 3.12 - Direções dos eixos 1 e 2 no prisma e velocidades das ondas emitidas em cada direção.	67
Figura 3.13 - Arranjo experimental da 1ª etapa do ensaio.	69
Figura 3.14 - Arranjo experimental da 2ª etapa do ensaio.	69
Figura 4.1 - Pulso de ondas registrado pelo aparelho e que foi emitido com ganho = 1x e voltagem de excitação = 125V.	74
Figura 4.2 - Pulso de ondas registrado pelo aparelho e que foi emitido com ganho = 5x e voltagem de excitação = 125V.	74
Figura 4.3 - Pulso de ondas registrado pelo aparelho e que foi emitido com ganho = 1000x e voltagem de excitação = 500V.	74

Figura 4.4 - Pulso de ondas registrado pelo aparelho com tempo de percurso de 27.2 μs e que foi emitido com ganho = 1000x e voltagem de excitação = 500V	75
Figura 4.5 - Relação entre os elementos dos vetores “amplitude 2” e “tempo” (a cada 0.01 μs).	76
Figura 4.6 - Relação entre os elementos dos vetores “absoluto” e “tempo” (a cada 0.01 μs)..	76
Figura 4.7 - Relação entre os elementos dos vetores “auxiliar” e “tempo” (a cada 0.01 μs). ..	77
Figura 4.8 - Relação entre os elementos dos vetores “derivada” e “tempo” (a cada 0.01 μs). ..	77
Figura 4.9 - Interface do programa para determinar o tempo de chegada das ondas de cisalhamento no pulso de ondas emitido no prisma sem tensão.....	78
Figura 4.10 - Amplitude nula entre duas amplitudes consecutivas (com sinais opostos) contidas no vetor “amplitude 2”	79
Figura 4.11 - Interface do programa com os possíveis tempos de percurso das ondas longitudinais presentes no pulso de ondas emitido no prisma sem tensão.....	80
Figura 4.12 - Formas de onda para diferentes valores de força aplicada (em kN).....	82
Figura 4.13 - Ampliação do trecho onde as ondas de cisalhamento se iniciam.	82
Figura 5.1 - Variação relativa da velocidade V_{11} em função da tensão uniaxial de compressão aplicada no prisma 2 considerando o ΔS real e o ΔS constante.	87
Figura 5.2 - Variação relativa da V_{11} em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 1 no 1°, 2° e 3° ensaios.	88
Figura 5.3 - Variação relativa da V_{12} em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 1 no 1°, 2° e 3° ensaios.	88
Figura 5.4 - Variação relativa da V_{21} em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 1 no 1°, 2° e 3° ensaios.	88
Figura 5.5 - Variação relativa da V_{22} em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 1 no 1°, 2° e 3° ensaios.	88
Figura 5.6 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 1.	89
Figura 5.7 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 2.	89
Figura 5.8 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 3.	90

Figura 5.9 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 4.....	90
Figura 5.10 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 5.....	90
Figura 5.11 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 6.....	90
Figura 5.12 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 7.....	90
Figura 5.13 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 8.....	90
Figura 5.14 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 9.....	91
Figura 5.15 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 10.....	91
Figura 5.16 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 11.....	91
Figura 5.17 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 12.....	91
Figura 5.18 - Variação relativa da V_{11} em função da tensão uniaxial aplicada nos prismas 1 ao 12.....	92
Figura 5.19 - Variação relativa da V_{12} em função da tensão uniaxial aplicada nos prismas 1 ao 12.....	92
Figura 5.20 - Variação relativa da V_{21} em função da tensão uniaxial aplicada nos prismas 1 ao 12.....	93
Figura 5.21 - Variação relativa da V_{22} em função da tensão uniaxial aplicada nos prismas 1 ao 12.....	93
Figura 5.22 - Trincas no prisma 11 após o 1º ensaio.	97
Figura 5.23 - Regressão linear nos gráficos referentes às OL_{11} e OL_{22} para o prisma 3.	98
Figura 5.24 - Regressão linear nos gráficos referentes às OL_{12} e OL_{21} para o prisma 3.	98
Figura 5.25 - Coeficientes acustoelásticos dos prismas 1 ao 12.	99
Figura 5.26 - A_{11} em função da resistência média à compressão do concreto (f_c).....	100

Figura 5.27 - A_{11} em função do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto (E).	100
Figura 5.28 - A_{11} em função do módulo de elasticidade transversal dinâmico do concreto (G).	101
Figura 5.29 - A_{12} em função da resistência média à compressão do concreto (f_c).	101
Figura 5.30 - A_{12} em função do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto (E).	101
Figura 5.31 - A_{12} em função do módulo de elasticidade transversal dinâmico do concreto (G).	101
Figura 5.32 - A_{21} em função da resistência média à compressão do concreto (f_c).	101
Figura 5.33 - A_{21} em função do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto (E).	101
Figura 5.34 - A_{21} em função do módulo de elasticidade transversal dinâmico do concreto (G).	102
Figura 5.35 - A_{22} em função da resistência média à compressão do concreto (f_c).	102
Figura 5.36 - A_{22} em função do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto (E).	102
Figura 5.37 - A_{22} em função do módulo de elasticidade transversal dinâmico do concreto (G).	102
Figura 5.38 - Valores de tensão fornecidos pela reta teórica e pela relação real para um mesmo valor de $\Delta V / V_0$	104
Figura 5.39 - Variação relativa das velocidades para o último valor de carga aplicado no prisma 3 e durante 30 minutos após descarregá-lo.	105
Figura 5.40 - Variação relativa das velocidades para o último valor de carga aplicado no prisma 10 e durante 10 minutos após descarregá-lo.	105
Figura A.1 - Arranjo experimental.	117
Figura A.2 - Medição da aceleração em função do tempo realizada por cada acelerômetro.	118
Figura A.3 - Direção de vibração (polarização) da onda emitida pelo transdutor de cisalhamento.	118
Figura B.1 - Esquema do ensaio (medidas em cm).	119

Figura B.2 - Modelos Numéricos: (a) aberturas no mesmo lado do prisma; (b) aberturas formando ângulo de 90°; (c) aberturas em lados os opostos do prisma.	120
Figura B.3 - Elemento finito sólido do tipo HX24L.	120
Figura B.4 - Deslocamento aplicado e restrições de deslocamento no modelo numérico.	121
Figura B.5 - Nomenclatura das faces do modelo 1.	122
Figura B.6 - Distribuição de σ_{11} (em MPa) nas quatro faces do modelo 1.	122
Figura B.7 - Nomenclatura das faces do modelo 2.	123
Figura B.8 - Distribuição de σ_{11} (em MPa) nas quatro faces do modelo 2.	123
Figura B.9 - Nomenclatura das faces do modelo 3.	124
Figura B.10 - Distribuição de σ_{11} (em MPa) nas quatro faces do modelo 3.	124
Figura C.1 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL_{11} e OL_{22} para o prisma 1.	127
Figura C.2 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC_{12} e OC_{21} para o prisma 1.	127
Figura C.3 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL_{11} e OL_{22} para o prisma 2.	127
Figura C.4 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC_{12} e OC_{21} para o prisma 2.	127
Figura C.5 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL_{11} e OL_{22} para o prisma 4.	128
Figura C.6 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC_{12} e OC_{21} para o prisma 4.	128
Figura C.7 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL_{11} e OL_{22} para o prisma 5.	128
Figura C.8 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC_{12} e OC_{21} para o prisma 5.	128
Figura C.9 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL_{11} e OL_{22} para o prisma 6.	128
Figura C.10 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC_{12} e OC_{21} para o prisma 6.	128
Figura C.11 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL_{11} e OL_{22} para o prisma 7.	129
Figura C.12 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC_{12} e OC_{21} para o prisma 7.	129
Figura C.13 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL_{11} e OL_{22} para o prisma 8.	129
Figura C.14 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC_{12} e OC_{21} para o prisma 8.	129
Figura C.15 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL_{11} e OL_{22} para o prisma 9.	129
Figura C.16 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC_{12} e OC_{21} para o prisma 9.	129
Figura C.17 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL_{11} e OL_{22} para o prisma 10.	130

Figura C.18 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC_{12} e OC_{21} para o prisma 10.	130
Figura C.19 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL_{11} e OL_{22} para o prisma 11.....	130
Figura C.20 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC_{12} e OC_{21} para o prisma 11.	130
Figura C.21 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL_{11} e OL_{22} para o prisma 12.....	130
Figura C.22 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC_{12} e OC_{21} para o prisma 12.	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Velocidade de propagação das ondas longitudinais	38
Tabela 2.2 - Velocidade de propagação das ondas de cisalhamento	38
Tabela 2.3 - Correções na velocidade da onda em função da temperatura	47
Tabela 3.1 - Composição granulométrica do agregado graúdo	61
Tabela 3.2 - Composição granulométrica do agregado miúdo	61
Tabela 3.3- Propriedades dos agregados utilizados nos 12 prismas	62
Tabela 3.4 - Traços dos concretos utilizados nos 12 prismas	62
Tabela 3.5 - Valores máximos de força e tensão aplicadas, valor do incremento de força e número de incrementos em um ciclo de carga para cada prisma.	69
Tabela 5.1 - Coeficientes de variação para os 10 valores de tempo de propagação obtidos ao emitir cada tipo de onda no prisma submetido a diferentes valores de força de compressão. .	85
Tabela 5.2 - Valores de densidade, resistência média a compressão, módulos de elasticidade dinâmicos e de coeficiente de Poisson determinados para os 12 prismas.	86
Tabela 5.3 - Variação das velocidades em cada prisma para o último valor de carregamento aplicado e tensão máxima de compressão aplicada em porcentagem do f_c	92
Tabela 5.4 - Variação no tempo de percurso para cada tipo de onda ultrassônica emitida em diferentes dimensões do prisma 4 quando é aplicado um valor de tensão de 10.68 MPa no prisma sem tensão	94
Tabela 5.5 - Intervalos de tensão (em % do f_c) dos trechos não lineares das curvas referentes às ondas para cada prisma.	96
Tabela 5.6 - Coeficientes acustoelásticos e seus respectivos R^2 para cada prisma.	100
Tabela 5.7 - Variação relativa da V_{12} para o último valor de carga aplicado nos prisma 1 ao 12 e durante 4 minutos após descarregá-los.	106
Tabela 5.8 - Variação relativa da V_{11} para o último valor de carga aplicado nos prisma 1 ao 12 e durante 4 minutos após descarregá-los.	106
Tabela 5.9 - Variação relativa da V_{21} para o último valor de carga aplicado nos prisma 1 ao 12 e durante 4 minutos após descarregá-los.	106
Tabela 5.10 - Variação relativa da V_{22} para o último valor de carga aplicado nos prisma 1 ao 12 e durante 4 minutos após descarregá-los.	106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Considerações iniciais	23
1.2	Objetivos	25
1.3	Justificativa	25
1.4	Metodologia	26
1.5	Apresentação dos capítulos	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	Ensaio não destrutivo	29
2.2	Teoria da propagação das ondas	33
2.3	Equipamentos utilizados no ensaio da velocidade do pulso ultrassônico	39
2.4	O método da velocidade do pulso ultrassônico	43
2.5	Fatores que influenciam a velocidade do pulso ultrassônico no concreto	45
2.6	Acustoelasticidade	48
2.6.1	Propagação de ondas ultrassônicas longitudinais e de cisalhamento em meio sólido, elástico, homogêneo e isotrópico sob tensão	48
2.7	Resumo do capítulo	58
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	61
3.1	Equipamentos e materiais utilizados	61
3.2	Ensaio nos prismas de concreto	66
3.3	Resumo do capítulo	71
4	PROGRAMA COMPUTACIONAL	73
4.1	Introdução	73
4.2	Formulação matemática	75
4.3	Interface gráfica	80
4.4	Resumo do capítulo	84

5	RESULTADOS	85
5.1	Resumo do capítulo	107
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
6.1	Conclusão	109
6.2	Propostas para trabalhos futuros	111
	REFERÊNCIAS	113
	APÊNDICE A	117
	APÊNDICE C	127

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o concreto é o material de construção mais utilizado no mundo atual. As estruturas de concreto estão sujeitas a diversas ações que podem degradá-las. Portanto, é necessário realizar avaliações regulares nestas estruturas com o objetivo de fazer um controle da qualidade das mesmas e detectar os danos no seu estágio inicial. Assim, contribui-se para garantir a vida útil prevista para as estruturas e também se promove economia no reparo destas estruturas (LORENZI et al., 2003). O monitoramento das propriedades de uma estrutura pode ser realizado por meio dos ensaios não destrutivos (ENDs). Os ensaios não destrutivos implicam um dano não significativo ou nulo aos elementos ensaiados (ACI 228. 2R-98, 1998). Por isto, eles podem ser reaplicados num mesmo local ou em local muito próximo permitindo o monitoramento constante das condições da estrutura e o acompanhamento da variação de suas propriedades ao longo do tempo (LORENZI et al., 2003).

Os ensaios não destrutivos são práticas comuns na inspeção de metais e constituem ferramentas para fazer o controle de qualidade destes materiais (MALHOTRA; CARINO, 2004). De acordo com Andreucci (2011), os ENDs são aplicados para medir a espessura de peças metálicas e para detectar defeitos que podem ocorrer durante o processo de fabricação destas peças. Por exemplo, na detecção de descontinuidade internas, como fissuras e bolhas de gás. No entanto, segundo Malhotra e Carino (2004), o uso de ensaios não destrutivos na avaliação do concreto é relativamente novo comparado a outros materiais estruturais. O lento desenvolvimento de técnicas não destrutivas para o concreto ocorre por conta de sua heterogeneidade.

O ensaio com o ultrassom é um tipo de ensaio não destrutivo, cujo uso teve início em meados de 1950. De acordo com Lorenzi et al. (2003), este ensaio é baseado na propagação de ondas sonoras de alta frequência (acima de 20 kHz) pelo material ensaiado. Estes autores afirmam que entre os ENDs disponíveis, o ultrassom pode ser considerado como um dos mais promissores para a avaliação de estruturas de concreto, pois possibilita realizar um exame da homogeneidade do material detectando regiões heterogêneas na estrutura por meio da análise

da variação na velocidade de propagação das ondas. Através de sua utilização consegue-se realizar um controle total da estrutura, podendo-se avaliar inclusive as variações das propriedades elásticas do concreto com o tempo. A verificação da homogeneidade do concreto e a determinação de suas propriedades elásticas são as aplicações mais comuns do ensaio ultrassônico neste material.

Outra aplicação do ensaio com o ultrassom que pode ser interessante, mas que é pouco explorada é a medição do nível de tensão num material por meio da análise das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas. Esta aplicação tem como base a teoria da acustoelasticidade, desenvolvida em 1953 por Hughes e Kelly. De acordo com esta teoria, a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no elemento ensaiado está relacionada com o nível de tensão ao qual o material está submetido. Assim, foram desenvolvidas equações que relacionam a velocidade das ondas com o nível de tensão do material. Portanto, a técnica do ultrassom também poderia ser utilizada, por exemplo, para avaliar as tensões atuantes em pilares numa situação de recalques diferenciais, verificar o nível de protensão em cabos de estruturas protendidas pré-existentes como vigas protendidas (figura 1.1) e tirantes utilizados para fazer a contenção de solos (figura 1.2) e para avaliar tensões residuais em peças metálicas como tubos soldados para o transporte de óleo e gás. Existem poucos estudos voltados para a medição de tensões com o uso do ultrassom e a maioria deles trata de materiais metálicos.



Figura 1.1 - Viga protendida.
Fonte - CICHINELLI, 2012.



Figura 1.2 - Cortina atirantada para contenção do solo.
Fonte - CORSINI, 2011.

1.2 Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo principal estudar a possibilidade de medição de tensão no concreto com o uso do ultrassom baseado na teoria da acustoelasticidade.

A fim de alcançar o objetivo principal, foram elaborados os seguintes objetivos específicos:

- Estabelecer um critério para identificar a chegada das ondas longitudinais e de cisalhamento no pulso de ondas ultrassônicas recebido pelo transdutor receptor e registrado pelo aparelho de ultrassom.
- Definir um procedimento experimental para avaliar o efeito da variação de tensão na propagação das ondas ultrassônicas.
- Avaliar a influência do tipo de concreto nas constantes acustoelásticas.

1.3 Justificativa

Como foi visto, as estruturas de concreto necessitam de avaliações de seu estado continuamente. Isto é possível por meio do monitoramento destas estruturas mediante procedimentos que não causem danos a elas como o ensaio com o ultrassom, comumente utilizado para verificar homogeneidades e determinar as propriedades elásticas do concreto. Nesse contexto, a análise das tensões nas estruturas de concreto mediante o uso do ultrassom pode ser interessante, pois, somada às aplicações usuais deste e dos outros métodos, torna a avaliação das condições destas estruturas mais completa. A técnica poderia ser empregada para analisar as tensões existentes em pilares após sofrerem recalques diferenciais, por exemplo. Para tanto, é necessário realizar estudos que contribuam para possibilitar a medição de tensões no concreto com o ultrassom.

Além disto, o comportamento acustoelástico é muito pouco estudado, principalmente nas estruturas de concreto.

1.4 Metodologia

A metodologia desta pesquisa foi dividida em 6 etapas principais: revisão bibliográfica, simulação numérica, determinação da direção de vibração da onda de cisalhamento, desenvolvimento de softwares, ensaios experimentais e análise dos resultados experimentais.

- Revisão Bibliográfica

Esta etapa consistiu em realizar uma revisão bibliográfica para compreender a propagação das ondas ultrassônicas nos materiais, o método da velocidade do pulso de ondas ultrassônicas e sua aplicação no estudo das tensões.

- Simulação numérica

Nesta etapa foram realizadas simulações numéricas com o objetivo de descobrir qual era a configuração de ensaio que geraria a distribuição de tensão mais uniforme no prisma avaliado quando fosse aplicado sobre este um carregamento uniaxial de compressão.

- Determinação da direção de vibração das ondas de cisalhamento

Foi realizado um ensaio num prisma de concreto a fim de determinar qual era a direção de vibração (ou polarização) das ondas de cisalhamento ao serem emitidas pelo transdutor emissor de cisalhamento.

- Desenvolvimento de software

Esta etapa consistiu em desenvolver um programa computacional para informar o tempo de propagação das ondas ultrassônicas longitudinais e de cisalhamento a partir do pulso de ondas ultrassônicas que era registrado pelo aparelho de ultrassom.

- Ensaaios experimentais

Os ensaios foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas localizado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Os elementos ensaiados foram prismas de concreto com dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm. Os ensaios consistiram em aplicar diferentes valores de tensão de compressão uniaxial de maneira incremental. Após cada incremento a tensão era mantida constante durante a emissão de ondas ultrassônicas através dos elementos em direções específicas.

- Análise dos resultados

Esta etapa consistiu em fazer um estudo do comportamento acustoelástico do concreto e estudar a possibilidade de medir tensões no concreto com o uso do ultrassom.

1.5 Apresentação dos capítulos

O presente trabalho é dividido em 6 capítulos: introdução, revisão bibliográfica, programa experimental, programa computacional, resultados e considerações finais.

O capítulo 2 apresenta conceitos a respeito: dos ensaios não destrutivos, da teoria de propagação das ondas ultrassônicas, do método de ensaio com o ultrassom, de fatores que influenciam na velocidade de propagação das ondas no concreto e da teoria da acustoelasticidade. Também são apresentados alguns trabalhos que abordam a influência do estado de tensões do material sobre a velocidade das ondas ultrassônicas.

O capítulo 3 descreve os equipamentos e materiais utilizados nos ensaios e o procedimento experimental adotado.

O capítulo 4 refere-se ao desenvolvimento de um programa computacional para informar os tempos de propagação das ondas de cisalhamento e das ondas longitudinais presentes num pulso ultrassônico.

O capítulo 5 apresenta os resultados dos ensaios experimentais e a discussão.

Por fim, no capítulo 6 são realizadas as conclusões a respeito do estudo apresentado neste trabalho e sugestões do que pode ser abordado em pesquisas futuras sobre o tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ensaios não destrutivos

De acordo com o ACI 228. 2R-98 (1998), os ensaios não destrutivos são usados para determinar propriedades do concreto endurecido e para avaliar as condições do concreto em fundações profundas, pontes, edifícios, pavimentos, barragens e em outras construções de concreto. Os ensaios não destrutivos não causam danos às estruturas de concreto ou causam danos não significativos que não alteram o desempenho dos elementos estruturais. Os principais motivos para aplicação destes ensaios nas construções de concreto são:

- Realizar o controle de qualidade em novas construções;
- Solucionar problemas em novas construções;
- Avaliar as condições de construções antigas para fins de reabilitação;
- Realizar o controle de qualidade de reparos feitos no concreto.

Segundo o ACI 228. 2R-98 (1998), os ensaios não destrutivos são cada vez mais aplicados nas estruturas de concreto e este crescimento se deve aos seguintes fatores:

- Melhorias tecnológicas em hardware e software para coleta e análise de dados;
- Vantagens econômicas na análise de grandes volumes de concreto em comparação com a extração de amostras;
- Capacidade de realizar avaliações rápidas e abrangentes da estrutura existente;
- Especificação de métodos de ENDS para verificar a qualidade de fundações profundas e reparos feitos no concreto.

O aumento da aplicação dos ENDS nas construções de concreto ocorre apesar da falta de normas de ensaios para muitos métodos. O desenvolvimento destas normas é fundamental para a correta aplicação dos métodos de ensaio e ampliação do seu uso para avaliar estruturas de concreto. Tradicionalmente, a garantia da qualidade das construções de concreto é

realizada em grande parte por inspeção visual do processo de construção e por coletas de amostras do concreto fresco e endurecido para a realização de testes padronizados. No entanto, este procedimento não fornece dados sobre as propriedades do concreto em seu local de origem. Já o END apresenta a vantagem de fornecer as propriedades do concreto endurecido do local da estrutura onde foi executado o ensaio. Algumas destas propriedades são: propriedades elásticas, densidade, resistividade, teor de umidade e características de penetrabilidade (ACI 228. 2R-98, 1998).

Na avaliação das condições em que se encontra a estrutura de concreto, algumas das informações que podem ser obtidas com os ENDS são: dimensões de elementos, localização de fissuras, presença de vazios e de regiões de heterogeneidades no concreto como espaços vazios no interior da estrutura onde o concreto fresco não alcançou, localização de armaduras de aço e seu tamanho, atividades de corrosão das armaduras, entre outras (ACI 228. 2R-98, 1998).

Existem diversos métodos de ENDS que podem ser aplicados às estruturas de concreto. A seguir serão apresentados resumidamente alguns destes métodos encontrados na literatura.

- Inspeção visual

Muitas informações podem ser recolhidas por meio da inspeção visual para fornecer uma indicação preliminar das condições da estrutura e permitir elaborar um programa de testes para fazer uma avaliação mais aprofundada do problema. Algumas características visuais que podem ser observadas numa estrutura de concreto são: presença de trincas, deterioração do concreto, manchas na superfície da estrutura, armaduras expostas, entre outras (IAEA, 2002).

- Método do esclerômetro de reflexão de Schmidt

É um método utilizado para estimar a resistência à compressão do concreto e utiliza um aparelho chamado esclerômetro. Durante o ensaio, o esclerômetro gera um valor chamado “índice de reflexão” que é relacionado com a resistência à compressão do concreto aos 28 dias por meio de curvas de correlação desenvolvidas para isto (MALHOTRA; CARINO, 2004).

- Resistência à penetração

Este método determina a resistência à penetração do concreto, a qual é relacionada com sua resistência a compressão. Para tanto, é utilizada uma pistola que dispara um pino contra o concreto (CRAWFORD, 1997).

- Pacometria

Consiste em um método eletromagnético que utiliza um equipamento chamado pacômetro para localizar a armadura no concreto e estimar a espessura do cobrimento de concreto sobre ela (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

- Radar de penetração

Também é um método eletromagnético. Ele é utilizado em estruturas de concreto para detectar vazios e regiões de alto teor de umidade, localizar armaduras, medir a espessura de pavimentos e detectar delaminações que podem ocorrer por causa da corrosão da armadura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

- Método de absorção de ISAT

Este método é utilizado para avaliar a qualidade e durabilidade do concreto por meio da taxa de absorção de água pelo mesmo. No ensaio, uma coluna de pressão de água constante é aplicada à superfície do concreto e é medida a taxa de fluxo de água através dele por unidade de área (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

- Resistividade

É um método elétrico usado para determinar a resistividade do concreto que é um parâmetro importante na corrosão de estruturas de concreto armado. Concreto com alta resistividade tem pouca possibilidade de desenvolver corrosão na armadura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

- Potencial de corrosão

Consiste num método eletroquímico no qual o potencial de corrosão no aço do concreto armado é medido e seu valor pode ser usado para indicar a probabilidade de corrosão na armadura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

- Ressonância acústica

Este método pode ser aplicado para determinar propriedades elásticas do material. No ensaio, é aplicado um impacto numa região do elemento estudado e o som propagado através do elemento é capturado por um microfone. Após o processamento dos dados adquiridos, as frequências naturais podem ser identificadas e associadas com as propriedades elásticas do material (HAACH, V.G. et. al, 2013).

- Eco-impacto

Este método permite localizar falhas no interior de estruturas de concreto baseado na obtenção da velocidade e picos de frequência das ondas longitudinais emitidas na estrutura por meio de um impacto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

- Método da velocidade do pulso de ondas ultrassônicas

Este é o método utilizado no presente trabalho. O ensaio consiste em introduzir pulsos de ondas ultrassônicas no elemento em estudo e obter o tempo de propagação e a velocidade destes pulsos ao percorrerem uma distância conhecida. A figura 2.1 mostra o esquema de ensaio. Por meio das velocidades medidas é possível determinar o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico (E), o módulo de elasticidade transversal dinâmico (G) e o coeficiente de Poisson (ν) do concreto. Pode-se também detectar danos no interior da estrutura de concreto e estimar a sua resistência à compressão. Estas são as aplicações mais comuns deste método. Outra aplicação que pode ser interessante, mas que é pouco explorada na literatura é a avaliação do nível de tensão à qual um material está submetido. A medição de tensões com o uso do ultrassom está baseada na teoria da acustoelasticidade que relaciona as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas num material com a tensão que ele está submetido. Os conceitos teóricos necessários para entender este método de ensaio e sua aplicação na medição de tensão em elementos são estudados nos itens a seguir.

SCHIAVON, K.F.B.: Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensão em estruturas de concreto

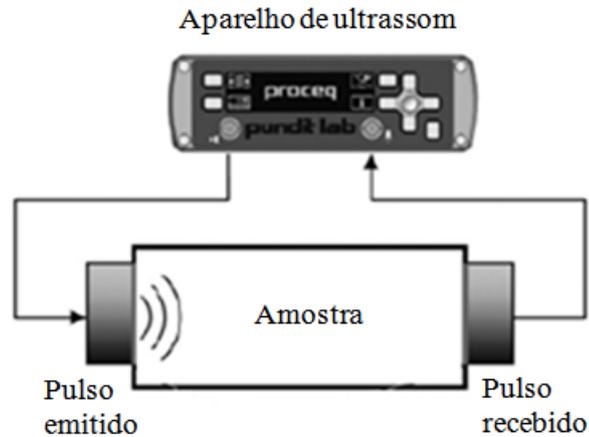


Figura 2.1 - Esquema de ensaio do método da velocidade do pulso de ondas ultrassônicas.
Fonte - Adaptado de PROCEQ®, 2013.

2.2 Teoria da propagação das ondas

As ondas ultrassônicas são ondas sonoras que vibram com uma frequência alta, acima de 20 kHz. As outras classes de ondas sonoras são o infrassom, cuja frequência de vibração é de até 20 Hz e o som, com frequência entre 20 Hz e 20 kHz, que é o intervalo de frequência audível para o ser humano. A figura 2.2 ilustra o espectro de frequências sonoras (ANDREUCCI, 2011).

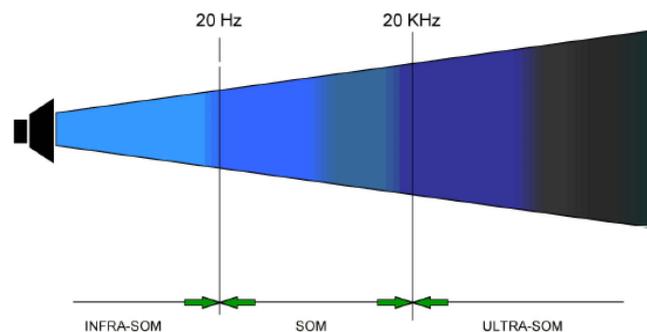


Figura 2.2 - Frequências sonoras.
Fonte - ANDREUCCI, 2011.

A frequência (f) é uma grandeza que indica o número de ciclos da onda que passam por um determinado ponto por segundo. Um ciclo completo é uma oscilação da onda correspondente ao comprimento da onda (λ) que é a distância entre duas cristas sucessivas. O

tempo para ocorrer um ciclo completo de onda ou o tempo necessário para que duas cristas sucessivas passem pelo mesmo ponto é chamado de período (T). A frequência corresponde ao inverso do período ($1/T$). Além destas grandezas, as ondas também apresentam amplitude (A), que é o deslocamento máximo da onda, e a velocidade. A velocidade da onda pode ser obtida em função de sua frequência e de seu comprimento de onda através da equação 2.1. Para ilustrar λ , T e A , considere o exemplo de onda na figura 2.3 (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

$$v = f\lambda \quad (2.1)$$

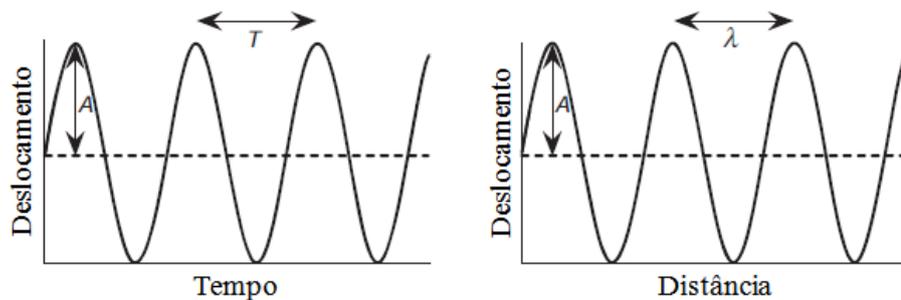


Figura 2.3 - Características das ondas.
Fonte - MEHTA; MONTEIRO, 2008.

Para um mesmo meio, ondas com maiores frequências possuem menores comprimento de onda e vice-versa. O comprimento de onda está relacionado com a máxima distância que as ondas ultrassônicas podem percorrer a o se propagarem num material (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Quando um pulso de ondas ultrassônicas colide em uma interface formada por materiais com propriedades diferentes, uma parte da energia destas ondas sofre dispersão para fora do caminho original do pulso (reflexão), ou seja, desvios em várias direções e outra parte sofre refração. Isto resulta na redução da energia das ondas dispersas ao percorrerem um material qualquer. Por exemplo, fissuras, vazios e os agregados presentes no concreto causam dispersão de parte da energia do pulso de ondas ultrassônicas. Esta dispersão é intensa quando o comprimento de onda é do mesmo tamanho ou menor que o tamanho do dispersor, o que resulta em rápida atenuação das ondas (perda de energia). No concreto, o limite máximo da frequência usual é de 500 kHz que está associado a um comprimento de onda de, aproximadamente, 10 mm. Como resultado a distância que um pulso de ondas com esta frequência pode percorrer no concreto é de apenas alguns centímetros. Para aumentar a distância que o pulso de ondas ultrassônicas pode percorrer é necessário emiti-las com

frequências menores. Ondas com frequência de 20 kHz podem percorrer distâncias maiores que 10 metros no concreto (MALHOTRA; CARINO, 2004).

O comprimento de onda também está relacionado com o tamanho do defeito a ser detectado. A menor descontinuidade que se consegue detectar num material possui diâmetro da ordem de $\lambda/2$ (ANDREUCCI, 2011).

Segundo Andreucci (2011), as ondas sonoras são classificadas como ondas mecânicas, pois, precisam de um meio material para se propagar. Durante a propagação, elas não transportam matéria, somente energia, fazendo com que as partículas que compõem o meio oscilem. Deste modo, o material sofre deformações elásticas com a passagem da onda. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), dependendo da direção da oscilação das partículas em relação à direção de propagação da onda podem existir quatro modos de propagação da onda no material: ondas longitudinais também conhecidas como ondas de compressão ou primárias (P), ondas transversais também conhecidas como ondas de cisalhamento ou secundárias (S), ondas Rayleigh e ondas Love. As ondas Rayleigh e Love são ondas de superfície, pois se propagam na superfície dos elementos.

Nas ondas longitudinais (figura 2.4), as partículas se movem para frente e para trás na mesma direção de propagação da onda gerando regiões comprimidas e dilatadas e uma alteração no volume do material (MEHTA; MONTEIRO, 2008). As ondas longitudinais apresentam amplitudes e períodos baixos e podem se propagar em meios sólidos, líquidos e gasosos (ANDREUCCI, 2011).

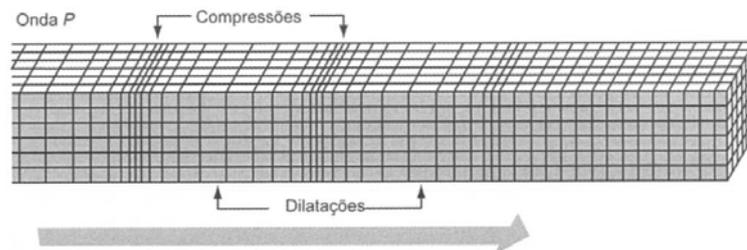


Figura 2.4 - Onda longitudinal.
Fonte - Adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2008.

Nas ondas cisalhantes (figura 2.5), as partículas do meio se movem para cima e para baixo num plano vertical perpendicular à direção de propagação da onda e não causam alteração de volume do material (MEHTA; MONTEIRO, 2008). As ondas cisalhantes se propagam apenas em meios sólidos e possuem amplitudes maiores do que as ondas longitudinais (ANDREUCCI, 2011).

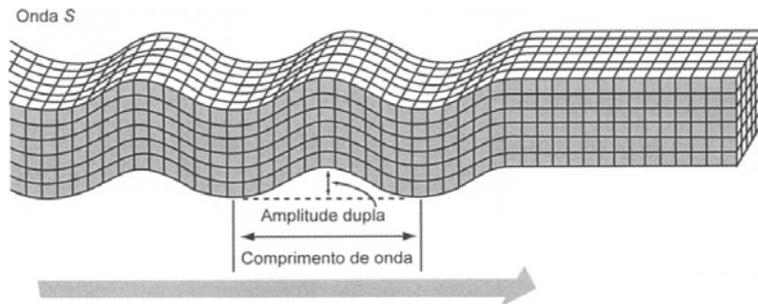


Figura 2.5 - Onda cisalhante.

Fonte - Adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2008.

Na onda Love (figura 2.6), as partículas se movem num plano horizontal de um lado para outro num movimento que é perpendicular à direção de propagação da onda. A onda Rayleigh (figura 2.7) é uma combinação das ondas longitudinal e cisalhante e provocam um movimento elíptico das partículas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

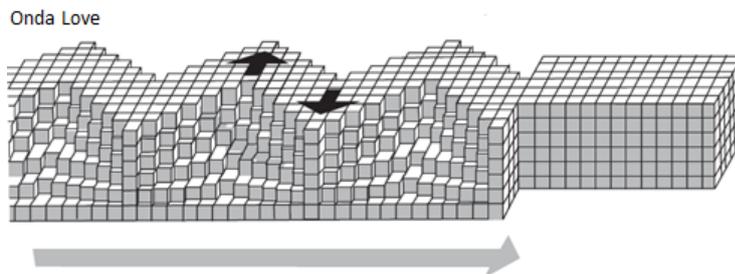


Figura 2.6 - Onda Love.

Fonte - Adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2008.

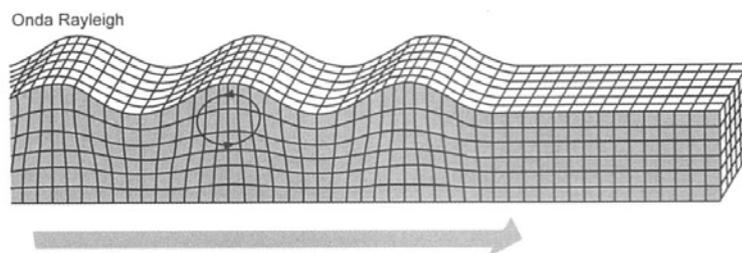


Figura 2.7 - Onda Rayleigh.

Fonte - Adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2008.

Para um mesmo sólido, as ondas longitudinais possuem a maior velocidade de propagação e as ondas de superfície possuem a menor velocidade. No concreto, as velocidades das ondas de cisalhamento e de superfície são em torno de 60% e 55%, respectivamente, da velocidade das ondas longitudinais (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Com base na teoria da elasticidade, a velocidade de uma onda está relacionada com as propriedades elásticas do material e a densidade do meio. Assim, conhecendo-se a velocidade da onda é possível determinar as propriedades elásticas de um material. As equações 2.2 a 2.6 mostram a relação que existe entre as velocidades das ondas longitudinais e de cisalhamento e as propriedades do material isotrópico e homogêneo (TIMOSHENKO, 1980).

$$V_L = \sqrt{\frac{K + 4/3G}{\rho}} \quad (2.2)$$

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (2.3)$$

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (2.4)$$

$$V_c = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.5)$$

$$\frac{V_L}{V_c} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (2.6)$$

Onde,

V_L e V_c = velocidades da onda longitudinal e de cisalhamento, respectivamente, num meio isotrópico e homogêneo.

K = módulo volumétrico.

λ = primeiro parâmetro de Lamé.

E = módulo de elasticidade longitudinal dinâmico.

G = módulo de elasticidade transversal dinâmico ou segundo parâmetro de Lamé.

ν = coeficiente de Poisson.

ρ = densidade do material.

A tabela 2.1 e a tabela 2.2 mostram a velocidade das ondas longitudinais e de cisalhamento, respectivamente, em alguns materiais.

Tabela 2.1 - Velocidade de propagação das ondas longitudinais

Material	Velocidade (m/s)
Ar	330
Aluminio	6300
Cobre	4700
Ouro	3200
Aço	5900
Aço inoxidável	5800
Nylon	2600
óleo (SAE30)	1700
Água	1480
Prata	3600
Titânio	6100
Níquel	5600
Tungstênio	5200
Magnésio	5800
Acrílico	2700
Aço fundido	4800

Fonte - ANDREUCCI, 2011.

Tabela 2.2 - Velocidade de propagação das ondas de cisalhamento.

Material	Velocidade (m/s)
Ar	-
Aluminio	3100
Cobre	2300
Ouro	1200
Aço	3200
Aço inoxidável	3100
Nylon	1100
óleo (SAE30)	-
Água	-
Prata	1600
Titânio	3100
Níquel	3000
Magnésio	3000
Acrílico	1100
Aço fundido	2400

Fonte - ANDREUCCI, 2011.

A onda sonora ao se propagar num material qualquer sofre em sua trajetória efeitos de dispersão e absorção, o que resulta na redução de sua energia ao percorrer o material. Esta redução de energia é denominada atenuação sônica. A dispersão, como já foi visto, deve-se ao fato de a matéria não ser totalmente homogênea, contendo interfaces naturais de sua própria estrutura, como é o caso das geradas pelos agregados no concreto, ou devido a processos de fabricação (aços). A absorção ocorre sempre que uma vibração acústica percorre um meio elástico. É a energia cedida pela onda para que cada partícula do meio execute o movimento de oscilação. Portanto, o resultado dos efeitos da dispersão e da absorção quando somados resultam na atenuação (ANDREUCCI, 2011).

2.3 Equipamentos utilizados no ensaio da velocidade do pulso ultrassônico

O aparelho de ultrassom consiste em um circuito gerador de pulsos, um circuito amplificador, um circuito de medição do tempo e uma unidade que exibe o tempo medido. É utilizado também um par de transdutores (emissor e receptor) ou apenas um transdutor (emissor e receptor ao mesmo tempo). Como este trabalho utiliza o primeiro tipo de transdutor é dele que este item irá tratar. Também são utilizados cabos coaxiais que ligam os transdutores aos circuitos gerador e receptor do aparelho de ultrassom (ASTM C 597-02, 2003). Estes equipamentos são ilustrados na figura 2.8.

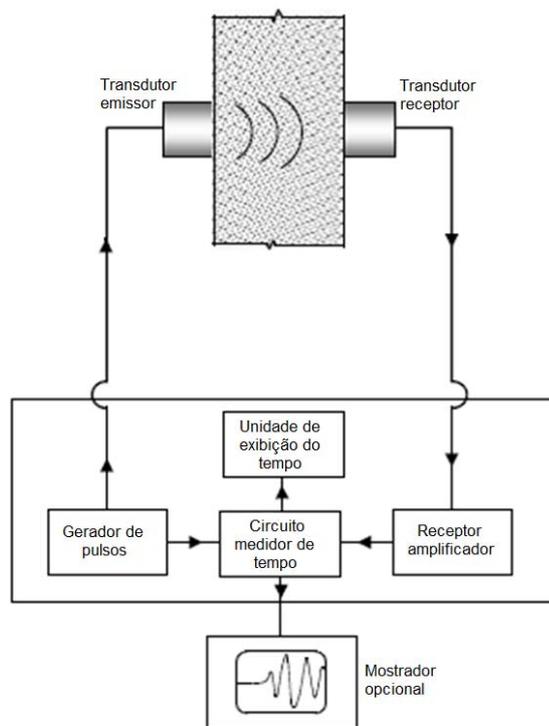


Figura 2.8 - Equipamentos do ensaio de velocidade do pulso ultrassônico.
Fonte - Adaptado de MALHOTRA; CARINO, 2004.

A figura 2.9 mostra do que é constituído um transdutor. Ele possui uma camada de um cristal piezoelétrico no seu interior que é revestida por dois eletrodos. Segundo Oliveira e Carvalho (2013), a piezoeletricidade é uma característica que alguns cristais possuem naturalmente.

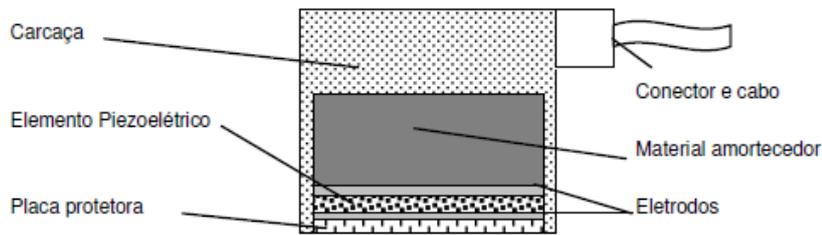


Figura 2.9 - Transdutor de ultrassom.
Fonte - MARQUES; SILVA JUNIOR, 2006.

Quando estes cristais piezoelétricos são comprimidos, surgem em ambas às faces cargas elétricas com sinais opostos, ou seja, é gerada uma diferença de potencial elétrico entre suas faces e o material fica polarizado. Este fenômeno é denominado efeito piezoelétrico. Também existe o efeito piezoelétrico reverso, que é a operação contrária. Quando as faces do cristal são carregadas eletricamente, gerando uma diferença de potencial elétrico entre elas, o cristal se contrai (figura 2.10). É um processo de transformação de energia mecânica em elétrica e vice-versa (ANDREUCCI, 2011).

No transdutor emissor ocorre o efeito piezoelétrico reverso e no transdutor receptor ocorre o efeito piezoelétrico. Então, estes dispositivos funcionam transformando um tipo de energia em outro.



Figura 2.10 - Contração e expansão do cristal quando submetido à alta tensão alternada e emissão de pulsos elétricos pelo cristal quando submetido à vibrações mecânicas.

Fonte - ANDREUCCI, 2011.

O circuito gerador de pulsos gera pulsos de corrente elétrica alternada que submete os eletrodos do transdutor emissor a uma alta tensão elétrica alternada fazendo com que o cristal se contraia e expanda ciclicamente permitindo a geração de ondas sonoras com alta frequência (pulsos de ondas ultrassônicas). A tensão elétrica alternada possui frequência igual à frequência ultrassônica emitida pelo cristal. Estas vibrações mecânicas deformam o cristal

contido no transdutor receptor fazendo com que sejam emitidos pulsos elétricos que chegam ao circuito amplificador do aparelho de ultrassom que é responsável por amplificar estes sinais elétricos (ANDREUCCI, 2011).

Estes sinais são tratados eletronicamente e o pulso de ondas ultrassônicas recebido pelo transdutor receptor é apresentado em uma chamada “forma de onda” que pode ser visualizada na própria tela do aparelho do ultrassom ou na tela de um computador que esteja conectado ao aparelho de ultrassom. A forma de onda é um gráfico da amplitude relativa do pulso de ondas em função do tempo (μs). Este tempo passa a ser contado a partir do momento que o pulso ultrassônico é emitido pelo transdutor emissor. A figura 2.11 é um exemplo de uma forma de onda. Nesta figura, são observados dois trechos. No primeiro, não existem amplitudes o que indica que o pulso de ondas emitido ainda não chegou ao transdutor receptor. A partir de um determinado tempo, o pulso chega a este transdutor e esta chegada é indicada pelo surgimento de amplitudes no gráfico (início do segundo trecho). O aparelho de ultrassom identifica o tempo inicial de surgimento destas amplitudes e informa este tempo como sendo o tempo que o pulso de ondas leva para sair do transdutor emissor e chegar ao receptor (tempo de propagação, tempo de percurso ou tempo de chegada). Na figura 2.11, este tempo é indicado e corresponde a $31,8 \mu\text{s}$. Segundo Malhotra e Carino (2004), a forma de onda é complexa, pois ela é formada por múltiplas reflexões de ondas.

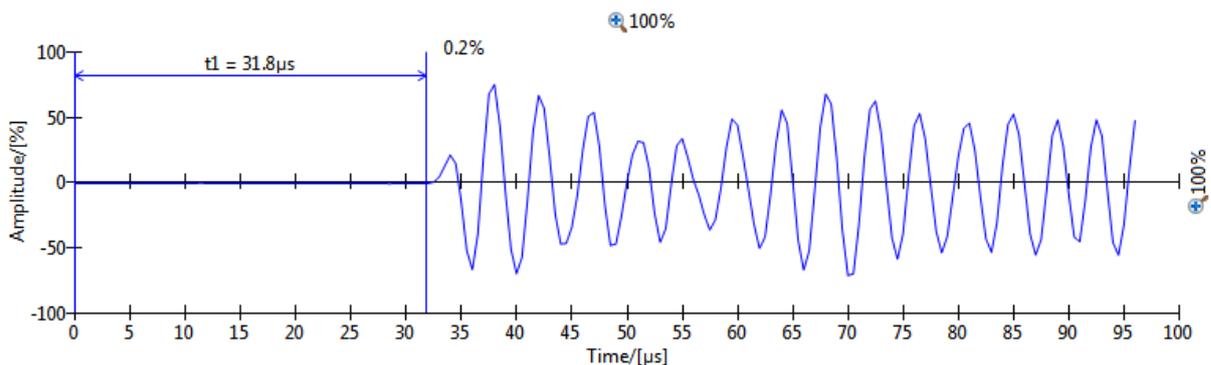


Figura 2.11 - Forma de onda de um pulso de ondas ultrassônicas recebido por um transdutor longitudinal receptor.

Para cada tipo de onda que se deseja emitir existe um transdutor específico. Quando se quer emitir ondas longitudinais são usados os transdutores longitudinais e quando se quer emitir ondas de cisalhamento, são utilizados os transdutores de cisalhamento. No entanto, na

geração das ondas de cisalhamento, também é gerada uma parcela de ondas longitudinais que por serem mais velozes chegam primeiro. O aparelho de ultrassom utilizado neste trabalho fornece apenas o tempo de percurso das ondas longitudinais. A figura 2.12 é exemplo de um pulso de ondas recebido pelo transdutor de cisalhamento. O trecho com menores amplitudes é constituído pelas ondas longitudinais do pulso de ondas e é o tempo de chegada destas que está sendo informado ($109,2 \mu\text{s}$). O trecho com maiores amplitudes é constituído pelas ondas de cisalhamento do pulso e também por ondas longitudinais refletidas. Um exemplo de forma de onda de um pulso recebido por um transdutor longitudinal foi apresentado na figura 2.11.

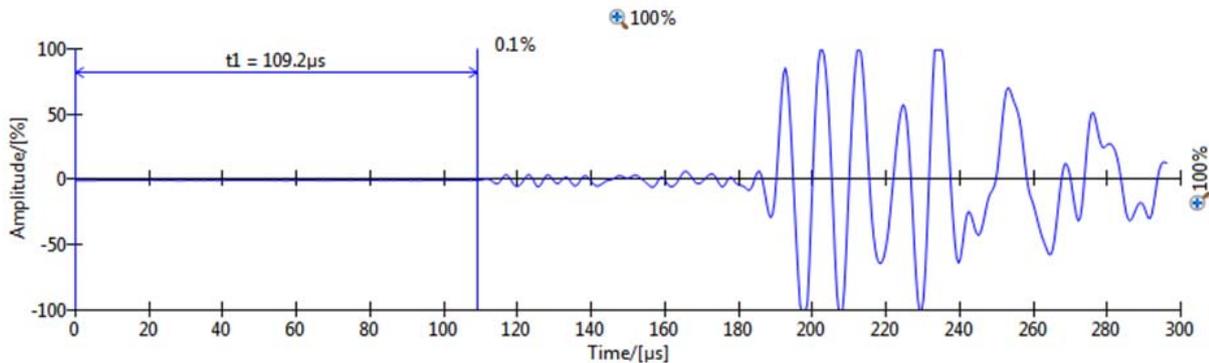


Figura 2.12 - Forma de onda de um pulso de ondas ultrassônicas recebido pelo transdutor de cisalhamento receptor.

Kidd et al. (2007) observaram que não só os transdutores de cisalhamento geram os dois tipos de onda, mas também os transdutores longitudinais que ao emitirem o pulso de ondas longitudinais geram uma parcela de ondas de cisalhamento.

Existem diversos fabricantes de equipamentos de ultrassom, entre eles a Proceq®, fabricante do equipamento utilizado nesta pesquisa. Os gráficos do pulso de ondas visualizados na figura 2.11 e na figura 2.12 foram gerados pelo Pundit Link, um software desenvolvido pela Proceq® para visualização da forma de onda do pulso de ondas ultrassônicas que chega ao transdutor receptor. De acordo com o manual da Proceq®, Shear Wave transducers (2013), o tempo de chegada da onda de cisalhamento no gráfico deve ser determinado manualmente por meio do deslocamento do cursor (reta vertical azul que marca o tempo de chegada da onda longitudinal no gráfico da figura 2.12) com o mouse na tela do computador. No entanto, não existem informações sobre que critérios adotar para conseguir identificar o ponto no gráfico que representa a chegada da onda cisalhante.

2.4 O método da velocidade do pulso ultrassônico

O método da velocidade do pulso ultrassônico consiste em introduzir pulsos de ondas ultrassônicas no interior do elemento e obter as medições de tempo de propagação e de velocidade de cada pulso. Além do tempo, a velocidade também é informada pelo aparelho de ultrassom que a calcula com base na equação 2.7. Para tanto, o usuário do aparelho deve fornecer o valor da distância de percurso (ΔS).

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (2.7)$$

Onde,

V = velocidade do pulso de ondas ultrassônicas.

ΔS = distância percorrida pelo pulso de ondas ultrassônicas.

Δt = tempo de percurso do pulso de ondas ultrassônicas.

De acordo com Andreucci (2011), o ensaio com o ultrassom pode ser realizado através de duas técnicas: a do pulso eco e a de transparência. Na primeira, somente um transdutor é responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas. Assim, o transdutor é acoplado somente em um lado do material. Na segunda técnica, são utilizados dois transdutores, um transmitindo e outro recebendo as ondas ultrassônicas. Neste caso, existem três maneiras de se acoplar os transdutores na peça, pelo arranjo de transmissão direta, semidireta e indireta. A figura 2.13 mostra os três tipos de arranjos.

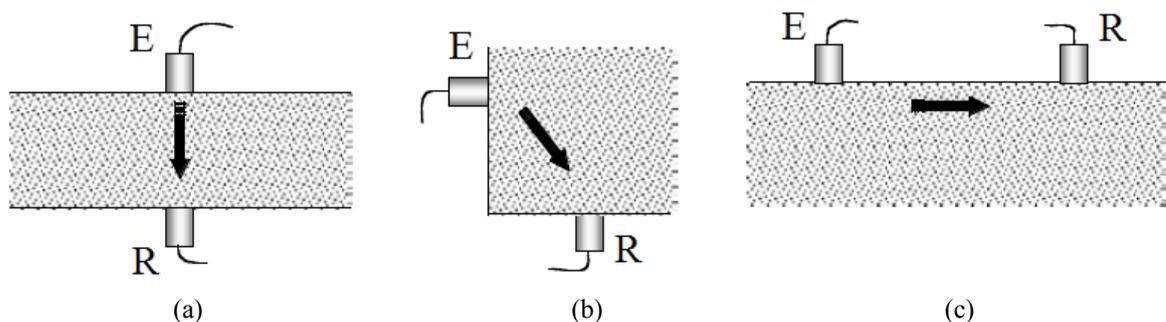


Figura 2.13 - Tipos de arranjos de transdutores (E = emissor; R = receptor): (a) transmissão direta; (b) transmissão semidireta e (c) transmissão indireta.

Fonte - Adaptado de MALHOTRA; CARINO, 2004.

Quando possível o arranjo direto deve ser utilizado, pois, com ele a distância percorrida pela onda é bem definida e o máximo de energia do pulso é recebido. O arranjo indireto é o menos indicado, porque as amplitudes do pulso recebido são significativamente menores do que as recebidas através do arranjo direto. O arranjo semidireto pode ser satisfatório se for tomado o cuidado de não deixar os transdutores muito distantes para evitar que as atenuações sofridas pelas ondas não permitam detectar os pulsos. Um exemplo de aplicação deste tipo de arranjo é para evitar regiões de concentração de armaduras de aço no concreto (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Entre a superfície do transdutor e a do elemento ensaiado precisa haver contato sem a presença de bolsas de ar, pois apenas uma quantidade desprezível de ondas ultrassônicas pode ser transmitida através do ar. Para eliminar o ar entre estas superfícies deve ser utilizado um material acoplante (MALHOTRA; CARINO, 2004). O material acoplante usado para transmitir ondas de cisalhamento ao elemento ensaiado possui alta viscosidade em comparação com aquele utilizado para transmitir as ondas longitudinais. No caso da onda de cisalhamento, é utilizada uma pasta grossa que é produzida especialmente para transmitir este tipo de onda. Um exemplo de material que pode ser utilizado quando se quer emitir ondas longitudinais é o gel usado para realizar ultrassonografia em hospitais. Outros exemplos são graxas de silicone ou mineral e vaselina as quais, segundo a ABNT NBR 8802:1994, podem ser utilizadas como acoplantes em concretos que tenham a superfície lisa.

O ensaio de ultrassom em estruturas de concreto é normalizado pela ABNT NBR 8802:1994. A norma brasileira recomenda que a execução do ensaio de ultrassom siga os seguintes passos:

- Primeiramente, os elementos a serem ensaiados precisam ser preparados. Eles precisam ter as superfícies planas, lisas e limpas. Os que não forem suficientemente lisos devem ter sua superfície regularizada a fim de garantir bom acoplamento com os transdutores. Além disto, os elementos de concreto a serem ensaiados devem ter as mesmas condições de composição e umidade relativa.
- O aparelho de ultrassom precisa ser calibrado usando a barra de referência que acompanha o aparelho.
- Uma fina camada de acoplante deve ser aplicada nas faces dos transdutores ou no elemento a ser ensaiado.

- Os transdutores devem ser posicionados de acordo com um dos arranjos apresentados anteriormente (arranjo para transmissão direta, semidireta ou indireta).
- O acoplamento e a pressão entre as superfícies dos transdutores e do elemento que está sendo ensaiado devem ser considerados satisfatórios quando for obtido o valor mínimo de leitura com variação de até $\pm 1\%$.
- A medida da distância entre os pontos nos quais serão acoplados os centros das faces dos transdutores deve ser determinada com precisão de $\pm 1\%$.

2.5 Fatores que influenciam a velocidade do pulso ultrassônico no concreto

O conhecimento dos fatores que podem afetar a velocidade das ondas ultrassônicas no concreto auxilia na compreensão das leituras dos tempos das ondas obtidas durante o ensaio. Estes fatores são apresentados a seguir.

- Relação água / cimento (a/c)

O aumento da relação a/c aumenta a porosidade no concreto. Como a velocidade das ondas ultrassônicas é menor no ar do que no concreto, isto gera diminuição na velocidade do pulso ao percorrê-lo.

- Agregados

Investigações mostraram que a velocidade das ondas ultrassônicas também é afetada pela quantidade e pelo tipo de agregado gráudo no concreto. Em geral, a velocidade das ondas na pasta de cimento é menor do que nos agregados gráudos por conta destes possuírem menor porosidade do que a pasta de cimento. Então, o aumento na quantidade de agregados, aumenta a velocidade das ondas ao percorrer o concreto (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Com relação ao tipo de agregado, a velocidade das ondas ultrassônicas é maior naqueles que possuem maior densidade (GERCINDO, 2011). Isto se deve ao fato de a densidade ser inversamente proporcional à porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Portanto, concretos com agregados mais densos apresentam maior velocidade das ondas.

A dimensão e a forma dos agregados também causam influência na velocidade das ondas ultrassônicas, pois estas características podem influenciar a maior ou menor porosidade e a maior ou menor fissuração na zona de transição (ZT) na interface agregado-pasta de cimento. Em geral, mantendo-se os demais fatores constantes, quanto maior o tamanho do agregado, mais espesso será o filme de água que se forma em torno dele quando o concreto está fresco. Isto contribui para uma maior relação a/c localizada na zona de transição, e conseqüentemente, ela apresentará maior porosidade, menor resistência e maior fissuração. Esta surge na ZT mesmo antes de a estrutura de concreto ter sido carregada, durante movimentos diferenciais entre o agregado e a pasta de cimento que ocorrem tanto na secagem quanto no resfriamento do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O aumento da fissuração e da porosidade no concreto diminui a velocidade das ondas ultrassônicas que se propagam mais rapidamente em meios sólidos do que em gasosos. Portanto, concreto com agregados maiores apresentará velocidades menores.

- Idade do concreto

À medida que continua a hidratação do cimento, a porosidade do concreto diminui e as ondas se propagam mais rapidamente em meio sólido (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O efeito da idade do concreto sobre a velocidade do pulso de ondas é semelhante ao efeito da idade sobre o desenvolvimento de resistência do concreto. No início, as velocidades crescem rapidamente e depois este crescimento diminui (MALHOTRA; CARINO, 2004).

- Contato do transdutor

O contato entre o transdutor e o elemento em estudo feito de maneira inadequada pode gerar leituras incorretas de velocidade pelo equipamento de ultrassom (MALHOTRA; CARINO, 2004).

- Umidade do concreto

A umidade do concreto também influencia na velocidade das ondas que no concreto saturado podem ser até 5 % maior do que no concreto seco (ASTM C 597-02, 2003). Provavelmente isto ocorre porque no concreto saturado os vazios presentes neste material estão preenchidos com água. Sabe-se que a velocidade das ondas ultrassônicas é maior na água do que no ar. Portanto, a velocidade será maior no concreto saturado.

Assim, recomenda-se cuidado na interpretação dos resultados em áreas da estrutura com diferentes teores de umidade (GERCINDO, 2011).

- Temperatura do concreto

A temperatura do concreto entre 5°C e 30°C não afeta a velocidade das ondas ultrassônicas. A tabela 2.3 mostra as correções na velocidade que são recomendadas para temperaturas fora deste intervalo (BS 1881:203, 1986 apud MALHOTRA; CARINO, 2004).

Tabela 2.3 - Correções na velocidade da onda em função da temperatura

Temperatura °C	Correção (%)	
	Concreto seco	Concreto úmido
60	5	4
40	2	1,7
20	0	0
0	-0,5	-1
Abaixo de -4	-1,5	-7,5

Fonte - BS 1881:203 (1986 apud MALHOTRA; CARINO, 2004).

A redução das velocidades do pulso de ondas ultrassônicas em temperaturas entre 40°C e 60°C é causada pela ocorrência de microfissuração interna no concreto. No caso de baixas temperaturas, o congelamento da água no interior do concreto proporciona o aumento da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (RILEM, 1972 apud GERCINDO, 2011).

- Distância de percurso da onda ultrassônica

A frequência da onda não afeta a sua velocidade no concreto. A distância percorrida pela onda, teoricamente, também não deveria afetar. No entanto, na prática, distâncias menores a serem percorridas pelas ondas no concreto levam a mais variações na velocidade do pulso e também a uma velocidade ligeiramente maior (MALHOTRA; CARINO, 2004). Imagina-se que a velocidade das ondas seja maior ao percorrer distâncias menores porque o número de reflexões das ondas nesta situação será menor.

- Presença de armaduras

A presença de barras de aço exerce grande influência na velocidade da onda no concreto uma vez que a velocidade das ondas no aço é cerca de 1.4 a 1.7 vezes maior do que no concreto. Assim, as leituras de velocidade realizadas em regiões do concreto próximas as barras de aço são maiores. Sempre que possível as emissões devem ser feitas em locais em que não existem barras de aço no caminho da onda. Mas, se isto ocorrer, há fatores de correção que devem ser utilizados (MALHOTRA; CARINO, 2004).

- Nível de tensão

Segundo Malhotra e Carino (2004), o nível de tensão sob o qual o material está submetido também afeta a velocidade das ondas ultrassônicas. Isto porque dependendo do valor da tensão aplicada sobre o elemento pode ocorrer o aumento de microfissuras já existentes no concreto e o surgimento de outras, o que reduz a velocidade das ondas ultrassônicas neste material. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a partir da aplicação de 30% da tensão última de compressão as microfissuras existentes no concreto começam a aumentar.

Outra razão para o nível de tensão no material influenciar a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas é o comportamento acustoelástico dos materiais. Este assunto será tratado no item 2.6.

2.6 Acustoelasticidade

Neste item, será estudado o efeito do estado de tensões do material na velocidade das ondas ultrassônicas. Este efeito será apresentado matematicamente por meio de equações desenvolvidas pela teoria da acustoelasticidade que relacionam a velocidade das ondas com a tensão do material.

2.6.1 Propagação de ondas ultrassônicas longitudinais e de cisalhamento em meio sólido, elástico, homogêneo e isotrópico sob tensão

As velocidades das ondas ultrassônicas longitudinais e de cisalhamento ao se propagarem num meio sólido, elástico, homogêneo, isotrópico e livre de tensões aplicadas são

aquelas mostradas pelas equações 2.2 a 2.6 (ORTEGA et al., 2011). Então, quando este meio está no seu estado natural, ou seja, sem tensão, as velocidades destas ondas dependem apenas da densidade do material (ρ) e de suas propriedades elásticas (E , G , ν , λ e K). Portanto, o valor da velocidade de propagação das ondas longitudinais e de cisalhamento no meio sólido, homogêneo, isotrópico e livre de tensões é constante, ou seja, independe da direção de propagação no material (CARMO et al., 2007).

Segundo Ortega et al. (2011), 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. Portanto, a mudança no estado de tensões do material resulta em variação da velocidade das ondas.

A presença de deformações elásticas no corpo gera efeito pequeno sobre a propagação da onda ultrassônica. Em materiais homogêneos e isotrópicos, deformações abaixo do limite elástico do material geram mudanças relativas na velocidade ($\Delta V/V^0$ onde V^0 é a velocidade da onda no corpo livre de deformações) da ordem de 0.1 %. Esta mudança na velocidade da onda é proporcional à tensão média na região através da qual a onda se propaga. Deste modo, é possível estudar o estado médio de tensões no interior do material. Algumas configurações experimentais que podem ser usadas neste estudo são mostradas na figura 2.14. Na figura 2.14a, as ondas incidem normalmente à superfície e são emitidas pela técnica do pulso eco, mas também poderia ter sido utilizada a técnica da transparência. Na figura 2.14b, a incidência é angular e a técnica utilizada é a da transparência. Na figura 2.14c, é mostrado um exemplo de emissão de ondas superficiais pela técnica da transparência. A emissão deste tipo de onda permite estudar as tensões em regiões próximas à superfície. A tensão média é determinada na região em que as ondas se propagam que está indicada pela faixa em branco nestas figuras (ORTEGA et al., 2011).

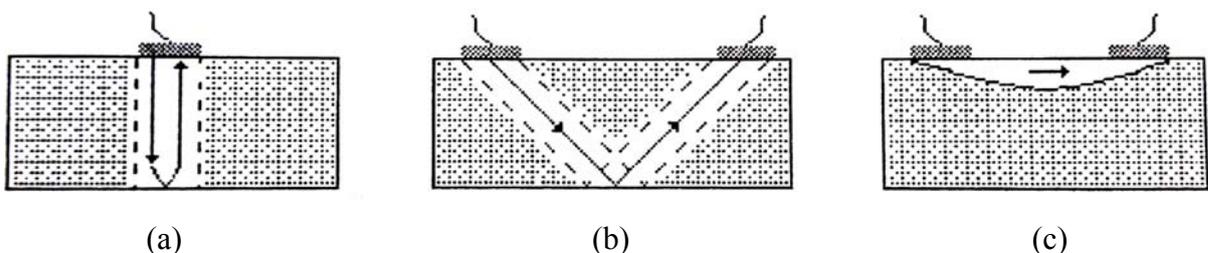


Figura 2.14 - Esquema de configurações de medições acustoelásticas.

Fonte - ORTEGA et. al, 2011.

O efeito do estado de tensões sobre a velocidade das ondas ultrassônicas foi descrito matematicamente por Hughes e Kelly em 1953 por meio da teoria da acustoelasticidade.

Segundo Ortega et al. (2011), num sólido isotrópico submetido a um estado de tensão uniaxial na direção do eixo cartesiano 1, as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas ao longo de cada uma das três direções principais do sólido são dadas pelas equações 2.8 a 2.12. No estado de tensão uniaxial, os eixos principais coincidem com os eixos cartesianos 1, 2 e 3.

$$\rho V_{11}^2 = \lambda + 2G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[2\ell + \lambda + \frac{\lambda + 2G}{G} (4m + 4\lambda + 10G) \right] \quad (2.8)$$

$$\rho V_{12}^2 = \rho V_{13}^2 = G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m + \frac{\lambda n}{G} + 4\lambda + 4G \right] \quad (2.9)$$

$$\rho V_{22}^2 = \rho V_{33}^2 = \lambda + 2G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[2\ell - \frac{2\lambda}{G} (m + \lambda + 2G) \right] \quad (2.10)$$

$$\rho V_{21}^2 = \rho V_{31}^2 = G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m + \frac{\lambda n}{4G} + \lambda + 2G \right] \quad (2.11)$$

$$\rho V_{23}^2 = \rho V_{32}^2 = G + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m - \frac{\lambda + G}{2G} n - 2\lambda \right] \quad (2.12)$$

Onde,

λ = primeiro parâmetro de Lamé.

G = módulo de elasticidade transversal dinâmico ou segundo parâmetro de Lamé.

K = módulo volumétrico.

m, n e ℓ = constantes elásticas de Murnaghan.

ρ = densidade do material.

σ_{11} é a tensão normal aplicada na direção do eixo 1.

As propriedades elásticas λ e K podem ser descritas matematicamente por meio de relações entre E e ν como as apresentadas nas equações 2.13 e 2.14 (TIMOSHENKO, 1980).

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.13)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.14)$$

As variáveis V_{11} , V_{12} , V_{22} , V_{21} e V_{23} são velocidades das ondas. O primeiro índice indica a direção de propagação da onda e o segundo, a direção de polarização da onda. Assim, V_{11} e V_{22} são velocidades de ondas longitudinais se propagando ao longo do eixo 1 e 2, respectivamente; V_{12} é a velocidade de uma onda cisalhante se propagando no eixo 1 e polarizada no eixo 2; V_{21} e V_{23} são as velocidades de ondas cisalhantes se propagando no eixo 2 e polarizadas nos eixos 1 e 3, respectivamente. A figura 2.15 ilustra as velocidades das ondas ultrassônicas num meio homogêneo e isotrópico submetido a uma tensão de compressão uniaxial na direção do eixo 1 (σ_{11}). As setas indicam a direção de propagação e as linhas em laranja a de polarização das ondas. Das nove velocidades apresentadas nesta figura apenas cinco são diferentes, pois, $V_{33} = V_{22}$, $V_{13} = V_{12}$, $V_{32} = V_{23}$ e $V_{31} = V_{21}$ (ORTEGA et al., 2011).

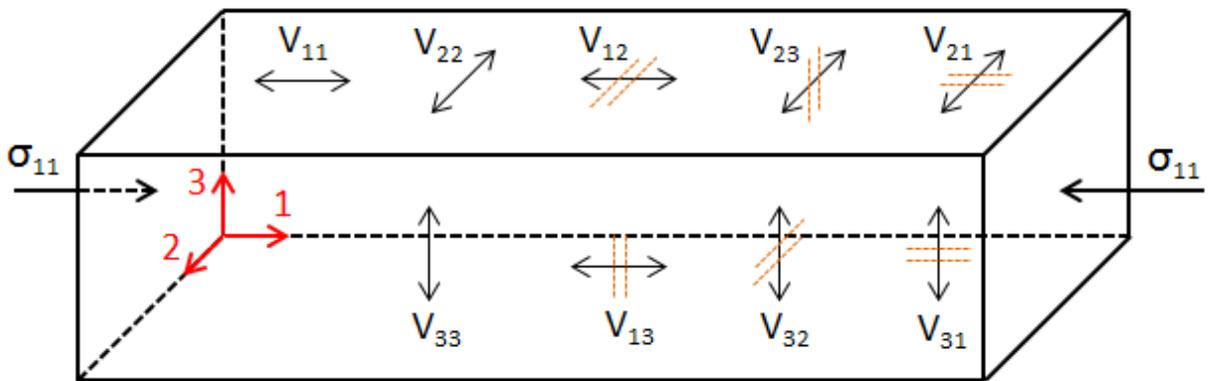


Figura 2.15 - Velocidade de ondas ultrassônicas num meio homogêneo e isotrópico submetido a uma tensão uniaxial na direção do eixo 1.

Fonte - Adaptado de Ortega et. al, 2011.

Observa-se que se o meio está sem tensão ($\sigma_{11} = 0$), as equações 2.8 a 2.12 representam a velocidade das ondas em um meio isotrópico livre de tensões (equações 2.4 e 2.5).

Por causa do efeito acustoelástico, o estado de tensões faz com que as velocidades das ondas dependam da direção da tensão aplicada e de sua magnitude, tornando o sólido previamente isotrópico em anisotrópico (ORTEGA et al., 2011).

Segundo Lillamand et al. (2010), as equações 2.8 a 2.12 podem ser linearizadas e representadas pela equação 2.15.

$$V_{ij}^{\sigma} = V_{ij}^0 (1 + A_{ij} \sigma_{11}) \quad (2.15)$$

Onde,

$i = 1, 2$ ou 3 .

$j = 1, 2$ ou 3 .

σ_{11} é a tensão normal atuante na direção de aplicação do carregamento (eixo 1).

V_{ij}^{σ} é a velocidade da onda no meio submetido a tensão uniaxial σ_{11} .

V_{ij}^0 é a velocidade da onda no meio livre de tensões.

A_{ij} é o coeficiente acustoelástico do material.

O coeficiente acustoelástico é dependente do material. Quanto maior o seu valor, maior é a variação da velocidade da onda ultrassônica ao se propagar no material submetido a um determinado nível de tensão.

A equação 2.15 também pode ser apresentada como na equação 2.16.

$$\frac{\Delta V}{V_{ij}^0} = A_{ij} \sigma_{11} \quad (2.16)$$

Observa-se na equação 2.16 uma relação linear entre a variação relativa da velocidade das ondas ultrassônicas ($\Delta V/V_{ij}^0$) e a tensão uniaxial no material. Portanto, o coeficiente acustoelástico (A_{ij}) é o coeficiente angular desta reta.

De acordo com Chaki e Bourse (2008), no caso de o material estar submetido à tensões uniaxiais de tração, o valor do coeficiente acustoelástico é negativo, o que significa que a velocidade das ondas diminuem com o aumento da tensão. O contrário também é válido. Num material sujeito a tensões uniaxiais de compressão, o coeficiente será positivo indicando que as velocidades aumentam com o acréscimo de tensão.

Lillamand et al (2010) afirmam que para um mesmo valor de tensão uniaxial aplicada no concreto e no aço, as ondas ultrassônicas apresentam maior sensibilidade à tensão ao se propagarem no concreto do que no aço. Ou seja, a variação de velocidade será maior no

primeiro material. No trabalho desenvolvido por estes autores, foi encontrada uma variação na velocidade V_{11} de 92 m/s quando o concreto estava submetido à tensão uniaxial média de 16 MPa. Já no aço, segundo os autores, geralmente é observada uma variação de velocidade de 50 m/s quando este material está submetido a uma tensão de tração de 500 MPa.

As equações 2.8 a 2.12 ou a equação 2.16 são fundamentais para a avaliação do estado de tensões e descrevem quantitativamente o efeito acustoelástico (ORTEGA et al., 2011).

De acordo com Lillamand et al. (2010) o concreto é um material heterogêneo, mas pode ser considerado homogêneo quando o comprimento de onda é grande comparado ao tamanho das heterogeneidades do concreto. Este material também pode ser considerado isotrópico porque os agregados estão distribuídos aleatoriamente. Neste contexto, a teoria da acustoelasticidade pode ser aplicada ao concreto.

Existem poucos trabalhos que estudam a influência do estado de tensões do material na velocidade das ondas ultrassônicas e, portanto, a possibilidade de medir tensões no material com o uso do ultrassom. Quando se trata do concreto, a dificuldade em encontrar tais trabalhos é ainda maior, pois eles geralmente exploram esta aplicação do ultrassom em materiais metálicos, como o aço. Alguns destes trabalhos são apresentados a seguir.

Lillamand et al. (2010) avaliaram a variação relativa da velocidade de ondas ultrassônicas longitudinais (OL) e de cisalhamento (OC) em função do nível de tensão axial de compressão aplicada num cilindro de concreto. A posição dos transdutores no cilindro e os tipos de ondas emitidas durante o ensaio em cada eixo estão apresentados na figura 2.16. Os gráficos da variação relativa da velocidade ($\Delta V/V^0$) em função da tensão de compressão no cilindro para cada tipo de onda emitida estão apresentados nas figuras 2.17 e 2.18. Foi observado que a variação na velocidade da onda para um determinado nível de tensão é maior quando a direção de polarização da onda é a mesma da direção de aplicação da tensão (OL_{11} e OC_{21} na figura 2.16). Ou seja, as ondas OL_{11} e OC_{21} possuem maior efeito acustoelástico do que os demais tipos de ondas emitidas. Os autores também notaram que entre as OL_{11} e as OC_{21} , a primeira possui a maior variação na velocidade. No estudo, também foi observado que as ondas ao percorrerem o concreto possuem maior sensibilidade à tensão do que ao percorrerem o aço.

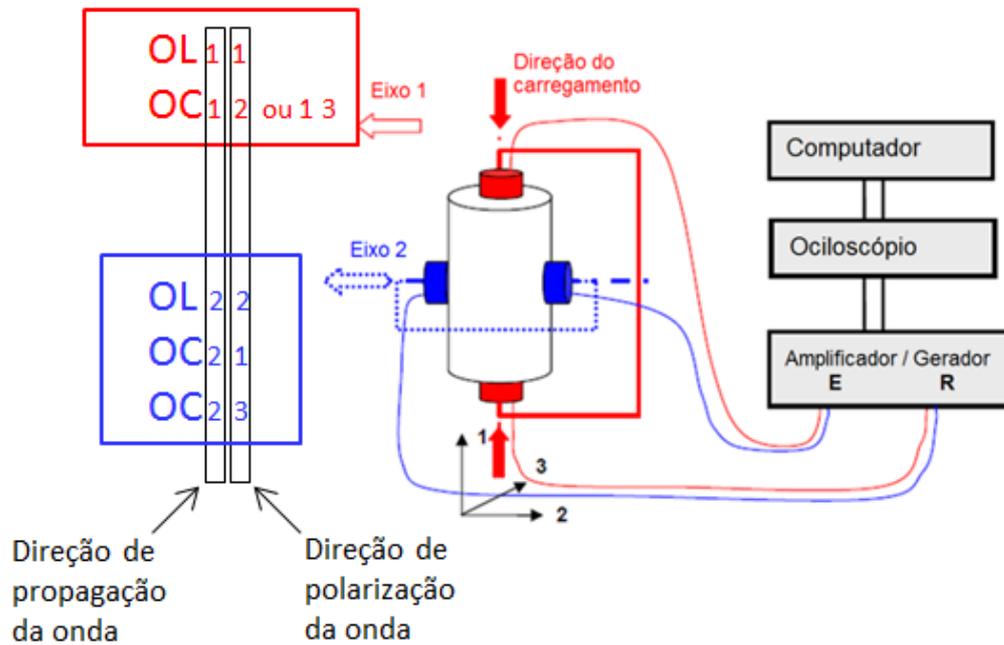
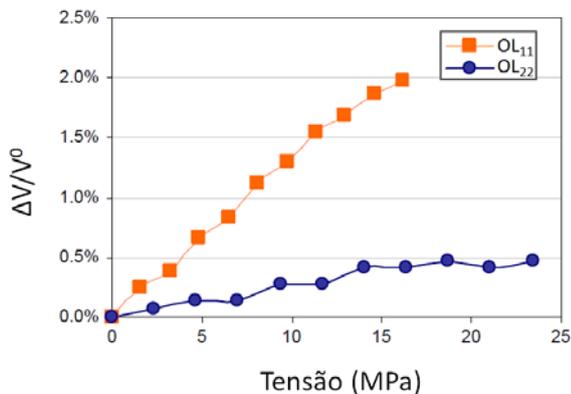
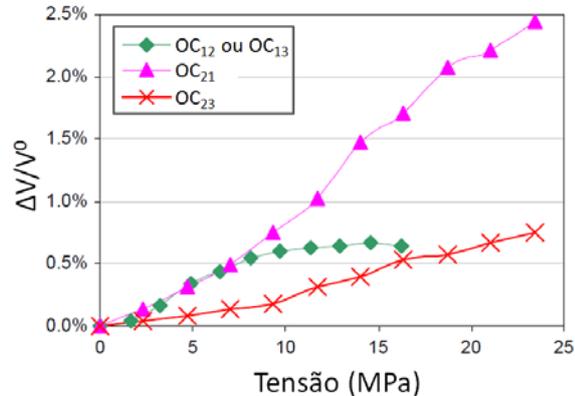


Figura 2.16 - Processo de medição e significado dos índices.

Fonte - Adaptado de LILLAMAND et al., 2010.

Figura 2.17 – Variação relativa da velocidade em função da tensão axial para as ondas longitudinais.
Fonte - Adaptado de LILLAMAND et al., 2010.Figura 2.18 - Variação relativa da velocidade em função da tensão axial para as ondas de cisalhamento.
Fonte - Adaptado de LILLAMAND et al., 2010.

Chaki e Bourse (2008) avaliaram o nível de tensão de tração em cordoalhas compostas por sete fios de aço por meio da propagação de ondas ultrassônicas longitudinais aplicadas na mesma direção de aplicação da tensão. Primeiramente, foram realizados dois testes de calibração (separados de um dia) em uma mesma cordoalha para a obtenção do seu coeficiente acustoelástico. Neste teste, foram aplicados incrementos iguais de carga de tração na cordoalha. Mantendo cada valor de carga constante, foram emitidas as ondas ultrassônicas longitudinais ao longo da cordoalha. O descarregamento foi realizado com passos de carga com mesmo valor daquele aplicado durante o carregamento. As ondas foram novamente

emitidas durante o descarregamento. As curvas da variação relativa da velocidade ($\Delta V / V^0$) em função da tensão de tração na cordoalha durante o carregamento e o descarregamento são apresentadas na figura 2.19.

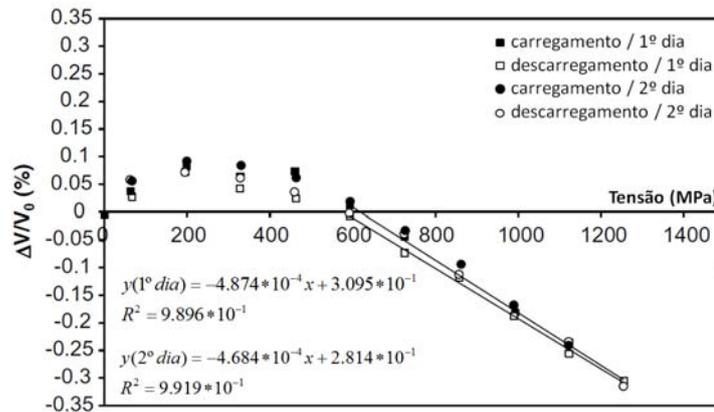


Figura 2.19 - Curvas da calibração acustoelástica durante o carregamento e descarregamento da cordoalha.
Fonte - Adaptado de CHAKI E BOURSE, 2008.

Os autores observaram dois comportamentos diferentes nas curvas da figura 2.19. O primeiro deles é o comportamento não linear positivo da curva entre 0 e 600 MPa, que corresponde a 32% da tensão última de tração do material. A partir deste nível de tensão, foi notado um comportamento linear negativo. Segundo Chaki e Bourse (2008), a variação não linear positiva que ocorre quando a cordoalha está sob baixos níveis de tensão, é um comportamento anômalo, pois não corresponde ao fenômeno acustoelástico apresentado pela equação 2.16. Os autores levantaram as seguintes possibilidades para explicar este comportamento discrepante: fortes forças de contato entre os fios individuais da cordoalha no intervalo de tensão de 0 à 600 MPa; tensões residuais pré-existentes nas cordoalhas; defeitos existentes ou a interação entre estas hipóteses.

Os coeficientes foram obtidos por regressão linear (figura 2.19). O valor médio destes coeficientes foi utilizado para avaliar as tensões em quatro cordoalhas pré-tensionadas (similares às utilizadas no ensaio de calibração) presentes num bloco de concreto protendido que foi construído em pequena escala. Em cada cordoalha foi aplicada uma tensão de tração diferente equivalente a 20%, 40%, 60% e 72% da tensão última de tração por meio de um macaco hidráulico (figura 2.20). Estes valores conhecidos de tensão foram então comparados com aqueles obtidos com o uso do ultrassom. Verificou-se que exceto para a cordoalha tensionada com 20% da tensão última de tração (localizada na parte não linear da curva de calibração) a tensão avaliada pelo ultrassom para as demais cordoalhas foi similar

àquela aplicada pelo macaco hidráulico. No entanto, os autores observaram que na prática, as tensões de serviço recomendadas para as cordoalhas são altas, entre 45% e 75% da tensão última. Portanto, numa estrutura real, as medidas obtidas com o ultrassom seriam confiáveis.

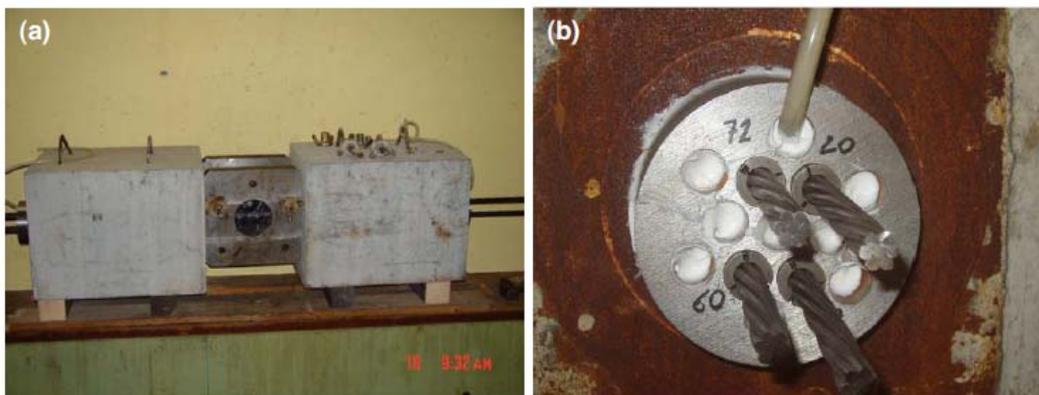


Figura 2.20 - Bloco de ancoragem: (a) visão global, (b) vista da placa de ancoragem.
Fonte - CHAKI E BOURSE, 2008.

Kleitsa et al. (2010) avaliaram a variação de parâmetros da onda ultrassônica, como o seu tempo de propagação e amplitude, em função do nível de tensão de tração existente em cordoalhas de aço usadas como tirantes para contenção de taludes. Esta avaliação foi feita de duas maneiras: por meio de uma avaliação experimental e de uma simulação numérica. Como, em campo, não se tem acesso às duas extremidades das cordoalhas, com o intuito de simular uma situação real, a avaliação dos parâmetros foi feita através da cabeça de ancoragem do tirante.

A análise experimental foi realizada por meio da propagação de ondas ultrassônicas longitudinais na seção transversal da cabeça de ancoragem (figura 2.21). O tempo de propagação e a amplitude da onda ao chegar ao transdutor receptor foram medidos para cada nível de tensão de tração aplicado. Segundo os autores, na prática, à medida que a tensão de tração nas cordoalhas aumenta o contato entre as cunhas e a placa da cabeça de ancoragem também aumenta o que eleva a rigidez da cabeça de ancoragem. Isto tem um efeito sobre o tempo de propagação das ondas e de sua amplitude. Então, a fim de simular a mudança na pressão de contato que existe entre as cunhas e a placa da cabeça de ancoragem conforme se aumenta a tensão de tração nas cordoalhas, foi utilizado um material de interface entre a cunha e a placa de ancoragem na modelagem numérica (as cordoalhas e as cunhas foram modeladas como um único círculo). Este material teve sua rigidez variada de acordo com o

nível de tensão aplicado que se queria simular (figura 2.22). Então, para simular acréscimos no valor da tensão aplicada, a rigidez era aumentada.

Os resultados experimentais e numéricos mostraram uma diminuição no tempo de propagação das ondas conforme se aumentava a tensão aplicada nas cordoalhas e a rigidez do material de interface, respectivamente. Então, os autores concluíram que um aumento no tempo de propagação das ondas na cabeça de ancoragem indicaria uma relaxação da pré-tensão nas cordoalhas. Também foi observado que as amplitudes correspondentes ao primeiro ciclo de ondas recebidas pelo transdutor, que eram aquelas que chegavam no tempo de $0 \mu\text{s}$ à $20 \mu\text{s}$ para este estudo, eram maiores à medida que o valor da tensão aplicada na cordoalha aumentava, ou, no caso da simulação numérica, à medida que a rigidez do material da interface aumentava. Isto por que, quanto maior o contato entre a cunha e a placa de ancoragem, menores são as reflexões sofridas pelas ondas na interface entre a cunha e a placa e, portanto, menor o espalhamento. Com isto, a amplitude da onda também poderia ser usada para detectar um relaxamento da tensão nas cordoalhas a partir da observação da diminuição da amplitude das ondas iniciais que chegam ao transdutor.

Kleitsa et al. (2010) também observaram que a amplitude da onda ao se propagar no interior de um material vai depender da sua heterogeneidade. Nos materiais homogêneos, a amplitude recebida pelo transdutor é similar àquela enviada. Em materiais heterogêneos, devido às reflexões, as ondas recebidas apresentarão amplitudes diferentes daquela enviada pelo sinal.

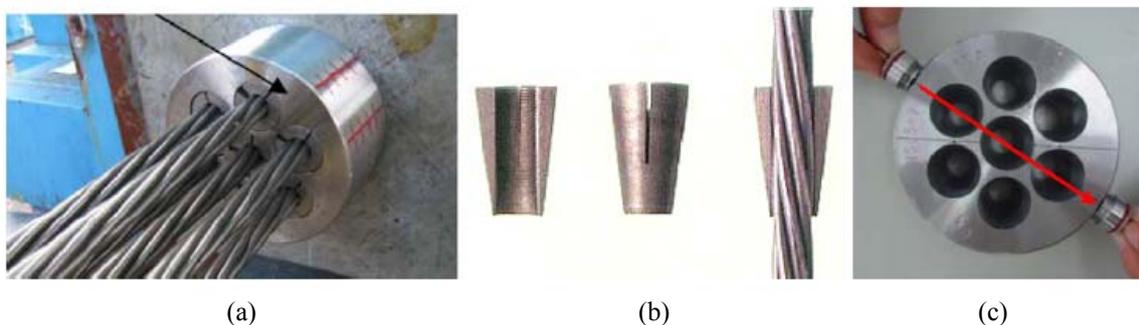


Figura 2.21 - (a) cabeça de ancoragem com as cordoalhas e as cunhas, (b) cunhas, (c) posição dos transdutores para a medição.

Fonte - Adaptado de KLEITSA et al., 2010.

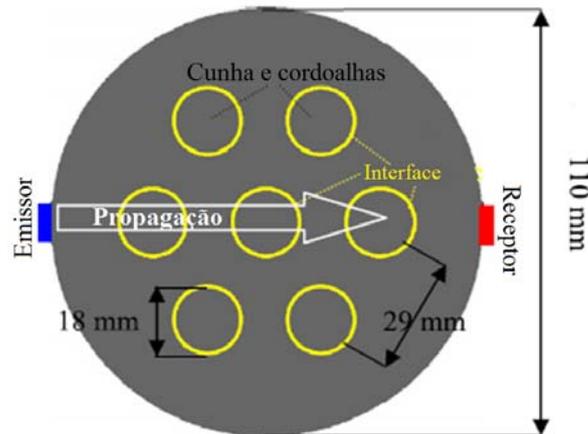


Figura 2.22 - Modelo numérico de uma seção transversal da cabeça de ancoragem.

Fonte - Adaptado de KLEITSA et al., 2010.

Aggelis et al. (2012) fizeram um estudo semelhante ao de Kleitsa et al. (2010), mas para um tirante constituído por uma haste de aço ao invés de cordoalhas. Os resultados obtidos foram similares ao de Kleitsa et al.

No trabalho de Kamyshev, Nikitina, e Smirnov (2009), as tensões residuais em duas rodas de veículo ferroviário foram medidas usando o método do ultrassom pela técnica do pulso echo. Foram emitidas ondas transversais em duas regiões opostas da superfície interna de cada roda. Em cada região foram realizadas medições do tempo de propagação das ondas em dois pontos na direção radial. Com estes dados, as tensões residuais foram calculadas em cada ponto estudado. Os resultados mostraram que a tensão encontrada foi de compressão e que seu valor cresce do centro para a periferia da roda. Para verificar a validade dos resultados encontrados pelo método do ultrassom, as tensões residuais também foram calculadas por meio de um ensaio de corte padrão. As tensões encontradas pelos dois métodos de avaliação foram muito próximas.

2.7 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foi apresentado o conceito de ensaios não destrutivos e suas possíveis aplicações na engenharia civil. Alguns tipos de ENDs foram citados e suas aplicações foram explicadas resumidamente. Também foram introduzidos conceitos a respeito da propagação

das ondas ultrassônicas, entre eles, os diferentes tipos de ondas e suas velocidades num meio isotrópico, homogêneo e livre de tensões.

Foram apresentados os equipamentos utilizados no ensaio com o ultrassom e o método de ensaio. Para auxiliar na compreensão das velocidades das ondas obtidas durante o ensaio no concreto, foi realizada uma análise sobre os diversos fatores que influenciam na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no concreto. A influência do estado de tensões do material na velocidade de propagação das ondas foi discutida e, então, foi introduzido o conceito de efeito acustoelástico. As equações desenvolvidas pela teoria da acustoelasticidade que relacionam o estado uniaxial de tensão do material com a velocidade das ondas ultrassônicas foram apresentadas. Por fim, foram mostrados alguns trabalhos nos quais o efeito acustoelástico foi estudado.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, são apresentados os equipamentos e os materiais utilizados durante os ensaios com os prismas de concreto. Também é descrito o procedimento experimental adotado para avaliar o efeito da variação da tensão na propagação das ondas ultrassônicas.

3.1 Equipamentos e materiais utilizados

Foram ensaiados 12 prismas de concreto, que apresentaram dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm. Eles foram concretados utilizando fôrmas metálicas e a direção de concretagem foi ao longo da altura de 15 cm. Os agregados utilizados em todos os prismas foram brita 1 e areia média. As composições granulométricas dos agregados graúdo e miúdo estão apresentadas nas tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente. Os valores de densidade e da massa unitária dos agregados estão indicados na tabela 3.3. O cimento utilizado foi o CP V- ARI. A tabela 3.4 apresenta os traços dos concretos.

Tabela 3.1 - Composição granulométrica do agregado graúdo.

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (%)
12.7	23.26
9.52	61.61
6.35	14.61
4.75	0.45
2	0
1.19	0
0.6	0.01
0.25	0.01
0.15	0
0.074	0.01
Fundo	0.04
Massa Retida total (%)	100

Tabela 3.2 - Composição granulométrica do agregado miúdo.

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (%)
4.76	0.45
2.36	1.78
1.19	5.66
0.59	21.04
0.297	32.33
0.149	33.63
0.074	4.48
Fundo	0.63
Massa Retida total (%)	100

Tabela 3.3- Propriedades dos agregados utilizados nos 12 prismas.

Agregado	Massa específica (kg/m³)	Massa unitária (kg/m³)
Areia	2625	1565
Brita	2804	1498

Tabela 3.4 - Traços dos concretos utilizados nos 12 prismas.

Prismas	Cimento	Areia	Brita	a/c
P1 ao P3	1	1.3	2.2	0.6
P4	1	1.3	2.2	0.47
P5	1	2.06	2.94	0.6
P6	1	2.83	3.87	0.76
P7	1	1.3	2.2	0.55
P8	1	2.83	3.87	0.86
P9	1	2.06	2.94	0.7
P10	1	2.83	3.87	0.9
P11	1	2.06	2.94	0.8
P12	1	1.3	2.2	0.66

Para cada traço de concreto foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Cada um deles foi ensaiado aos 28 dias de idade a fim de obter a resistência à compressão do concreto. A resistência média a compressão do concreto (f_c) foi determinada pelo cálculo da média das resistências obtidas para os 3 corpos de prova ensaiados. Estes resultados estão apresentados na tabela 5.2.

O módulo elástico longitudinal dinâmico (E), o módulo elástico transversal dinâmico (G) e o coeficiente de Poisson (ν) do concreto de cada prisma foram obtidos por meio de ensaios utilizando o ultrassom. As propriedades elásticas calculadas estão apresentadas na tabela 5.2 junto com a densidade (ρ) e a resistência média a compressão aos 28 dias de cada prisma (f_c).

O equipamento de ultrassom utilizado durante os ensaios foi o modelo Pundit Lab⁺ da Proceq® (figura 3.1). A visualização e análise das ondas foram feitas por meio do software Pundit Link, também desenvolvido pela Proceq®. Para emitir e receber os pulsos de ondas foram utilizados dois transdutores de cisalhamento com frequência de 250 kHz. Cada transdutor possui, aproximadamente, 4 cm de diâmetro e 3 cm de altura (figura 3.2).

O transdutor emissor emite ondas de cisalhamento polarizadas na mesma direção do conector do transdutor. A direção de polarização (ou de vibração) foi determinada por meio de um ensaio que está apresentado no apêndice A.

SCHIAVON, K.F.B.: Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensão em estruturas de concreto



Figura 3.1 - Equipamento de ultrassom Pundit Lab⁺.
Fonte: www.proceq.com/po/produtos/teste-de-concreto/testes-ultrassonicos/pundit-lab-plus.html.



Figura 3.2 - Transdutores de cisalhamento com frequência de 250 kHz.

Para acoplar os transdutores à superfície do elemento ensaiado foi utilizada uma pasta de acoplamento específica para transdutores de cisalhamento desenvolvida pela Sonotech.

Um cilindro desenvolvido pela Proceq® foi utilizado para realizar a calibração do aparelho de ultrassom. Este cilindro possui 10 cm de comprimento e está ilustrado na figura 3.3 que apresenta um teste de calibração.

Um macaco hidráulico fabricado pela Enerpac foi utilizado para aplicar força no elemento ensaiado. O cilindro hidráulico foi preso em um pórtico fixado numa laje de reação do laboratório. Uma célula de carga com capacidade de 500 kN foi fixada no cilindro e para visualizar a força medida por ela foi utilizado um equipamento P3 da marca Vishay (figura 3.4).



Figura 3.3 - Calibração do equipamento de ultrassom.



Figura 3.4 - Equipamento P3.

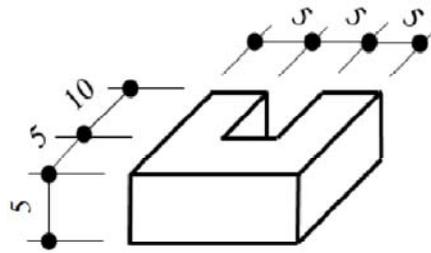
Nos ensaios, ondas ultrassônicas foram emitidas através do prisma estudado durante o seu carregamento. Uma das direções de emissão destas ondas foi a mesma de aplicação da

força (vertical) e, para tanto, foi necessário acoplar um transdutor na face do elemento que ia receber a carga e o outro transdutor na face oposta, que estava apoiada. Para possibilitar acoplar os transdutores nestas faces foi necessário construir duas peças de aço contendo uma abertura e posicionar uma delas acima do elemento e a outra abaixo dele (figura 3.5). Deste modo, os transdutores puderam ser acoplados na face que recebia o carregamento e naquela que era apoiada. A figura 3.6 mostra o aparato experimental. Observa-se nesta figura que sobre a peça de aço em forma de U, posicionada acima do prisma, foi colocada uma placa de aço. Esta placa possui 1.5 cm de espessura e tem a função de receber o carregamento do atuador hidráulico e transmiti-lo para a peça de aço.

O estudo para a determinação da posição mais adequada de ambas as peças de aço no prisma de concreto está apresentado no apêndice B.



(a)



(b)

Figura 3.5 - (a) peça de aço com formato em U; (b) dimensões da peça de aço (medidas em cm).

SCHIAVON, K.F.B.: Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensão em estruturas de concreto



Figura 3.6 - Aparato experimental com o prisma de concreto.

A fim de manter um transdutor fixo na superfície que recebia o carregamento e o outro na superfície oposta durante o ensaio, foram utilizadas duas peças de isopor como a apresentada na figura 3.7. As figuras 3.8 e 3.9 apresentam os transdutores fixos na face superior do prisma e na face inferior, respectivamente.

Os transdutores também precisaram ser mantidos fixos nas laterais do prisma durante parte do ensaio. Para tanto, foi utilizada uma faixa de borracha que envolveu o prisma e os transdutores (figura 3.10).



Figura 3.7 - Peça de isopor utilizada para fixar os transdutores na face superior e inferior do prisma.



Figura 3.8 - Peça de isopor mantendo o transdutor fixo na face superior do prisma.



Figura 3.9 - Peça de isopor mantendo o transdutor fixo na face inferior do prisma.



Figura 3.10 - Faixa de borracha utilizada para manter os transdutores fixos nas faces laterais do prisma.

3.2 Ensaios nos prismas de concreto

Os ensaios foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas localizado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). O objetivo dos ensaios foi obter o registro das ondas ultrassônicas longitudinais (OL) e de cisalhamento (OC) ao se propagarem no interior do prisma submetido a diferentes valores de carregamento de compressão uniaxial para que, com estes registros, pudessem ser calculados os tempos de percurso destas ondas. Por meio destes tempos pôde-se encontrar a velocidade das ondas ultrassônicas. As ondas foram emitidas em duas direções perpendiculares entre si. Uma delas foi ao longo do comprimento do prisma, na direção do eixo 1, que era a mesma direção da aplicação do carregamento. As ondas emitidas na direção 1 foram designadas OL₁₁ e OC₁₂. O primeiro índice indica a direção de propagação da onda e o segundo, a direção de polarização da onda. Assim, as velocidades obtidas quando as ondas foram emitidas na direção 1 foram as V₁₁ e V₁₂. A outra direção de emissão das ondas foi a do eixo 2 na direção transversal do prisma. As ondas emitidas nesta direção foram chamadas OL₂₂ e OC₂₁ e as velocidades obtidas foram as V₂₂ e V₂₁. A figura 3.11 apresenta a nomenclatura utilizada para referenciar cada tipo de onda e ilustrações destas ondas ao serem emitidas no interior do prisma durante os ensaios. A figura 3.12 mostra onde estão localizadas as direções dos eixos 1 e 2 em cada prisma que foi ensaiado e as velocidades estudadas em cada direção.

SCHIAVON, K.F.B.: Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensão em estruturas de concreto

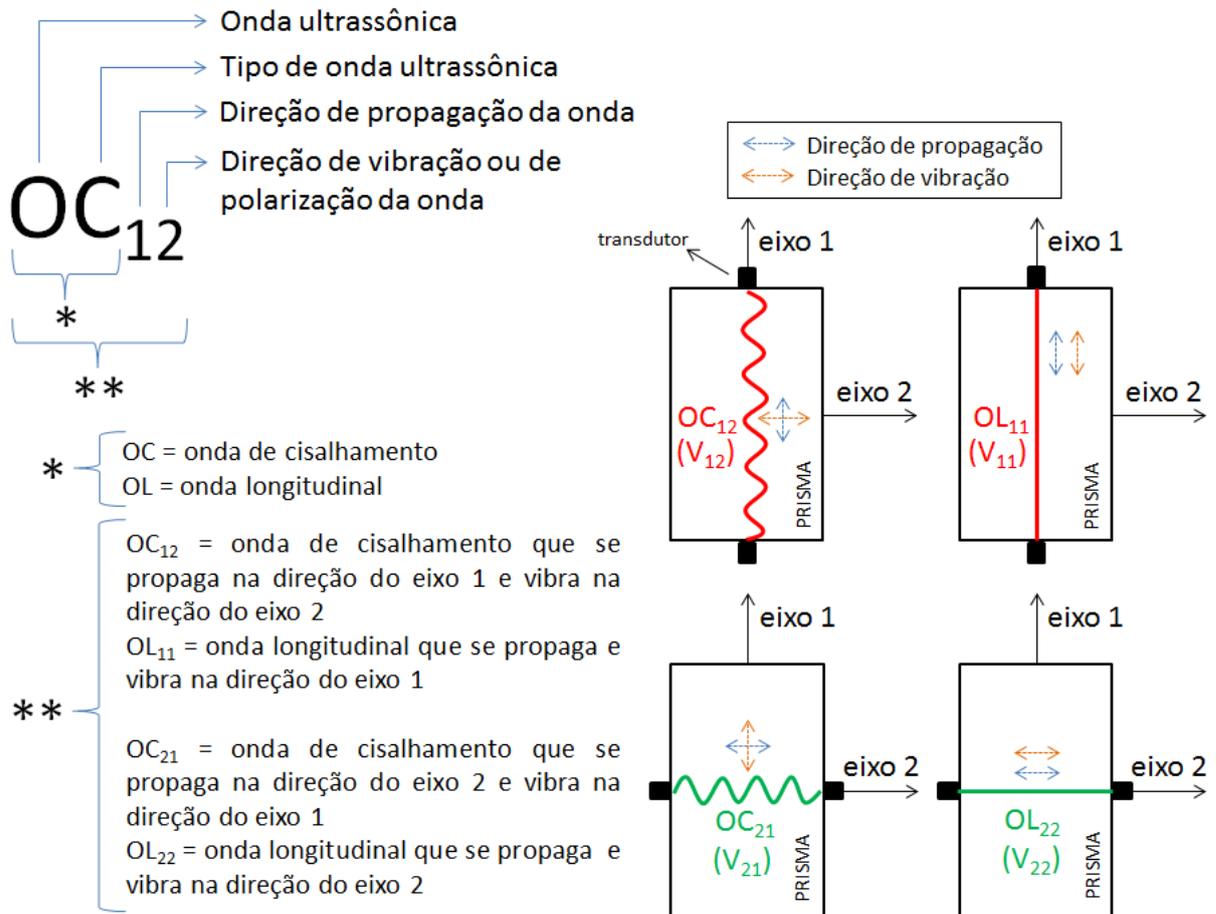


Figura 3.11 - Nomenclatura de cada tipo de onda ultrassônica e suas ilustrações ao serem emitidas nas direções do eixo 1 e 2 do prisma durante o ensaio.



Figura 3.12 - Direções dos eixos 1 e 2 no prisma e velocidades das ondas emitidas em cada direção.

O ensaio em cada prisma foi formado por duas etapas. Na primeira, um dos transdutores era acoplado no meio da face superior do prisma e o outro, no meio da face inferior. Após, eram aplicados incrementos iguais de força de compressão na direção longitudinal do prisma. Mantendo cada incremento de força constante os pulsos de ondas ultrassônicas eram emitidos. Primeiro eram emitidos 10 pulsos, cujos registros seriam utilizados para a determinação do tempo de chegada das ondas de cisalhamento (OC_{12}) com o uso do programa desenvolvido (item 4). Depois, eram alteradas as configurações de ganho e voltagem de excitação do aparelho de ultrassom e mais 10 pulsos eram emitidos cujos registros seriam utilizados para obtenção do tempo de chegada das ondas longitudinais (OL_{11}) utilizando o mesmo programa (item 4). A figura 3.13 ilustra a 1ª etapa do ensaio.

Ao final desta etapa o prisma era descarregado e um monitoramento era realizado durante o qual eram emitidas ondas ultrassônicas com o objetivo de poder comparar as velocidades de propagação das ondas no prisma sem tensão antes e depois da aplicação do ciclo de carregamento.

Na segunda etapa, um dos transdutores era acoplado no meio de uma das superfícies laterais do prisma e o outro no meio da superfície oposta. Ambas as superfícies estavam perpendiculares ao eixo 2 do prisma. Após, eram aplicados os mesmos valores de incremento de força da 1ª etapa. Mantendo cada valor de força constante, eram emitidos os pulsos de ondas ultrassônicas nesta direção. Do mesmo modo que foi feito na 1ª etapa, primeiro eram emitidos 10 pulsos, cujos registros seriam utilizados pelo programa para a determinação do tempo de chegada das ondas de cisalhamento (OC_{21}). Depois, eram alterados os valores de ganho e voltagem de excitação e emitidos mais 10 pulsos cujos registros seriam lidos pelo programa para determinar o tempo de chegada das ondas longitudinais (OL_{22}). A figura 3.14 ilustra a 2ª etapa do ensaio.

Assim como na etapa anterior, ao final da 2ª etapa o prisma era descarregado e era realizado um monitoramento.



Figura 3.13 - Arranjo experimental da 1ª etapa do ensaio



Figura 3.14 - Arranjo experimental da 2ª etapa do ensaio.

Então, em cada etapa do ensaio foi aplicado um ciclo de carregamento no prisma. Em um ensaio completo foram aplicados 2 ciclos iguais de carregamento no prisma. O valor máximo de força aplicada foi calculado para gerar tensões de compressão menores do que 30% do f_c do concreto, a fim de evitar que o aumento da fissuração no material afetasse o tempo de propagação das ondas ultrassônicas. Como os prismas estudados possuíram diferentes valores de resistência à compressão, o máximo valor de força e, conseqüentemente, de tensão aplicada não foi o mesmo para todos os prismas. A tabela 3.5 apresenta os máximos valores de força e de tensão aplicadas, o valor do incremento de força e o número de incrementos durante um ciclo de carga para cada prisma.

Tabela 3.5 - Valores máximos de força e tensão aplicadas, valor do incremento de força e número de incrementos em um ciclo de carga para cada prisma.

Prismas	Força_{máx.}(kN)	Tensão_{máx.} (MPa)	Incremento (kN)	Nº de incrementos
P1, P7 e P11	220	9.778	20	11
P2, P3 e P4	240	10.667	20	12
P5 e P12	200	8.889	20	10
P6 e P8	140	6.222	10	14
P9	180	8	20	9
P10	100	4.444	10	10

Antes da execução de cada etapa do ensaio, foi realizada a calibração do equipamento de ultrassom a fim de garantir que o tempo de percurso das ondas informado pelo aparelho

estivesse correto. A calibração foi realizada emitindo-se ondas ultrassônicas através de um cilindro próprio para ser utilizado no teste de calibração. Neste cilindro, vem especificado o tempo que as ondas longitudinais levam para percorrê-lo, 24.5 μ s. Ao emitir as ondas através do cilindro, este tempo precisa ser confirmado pelo aparelho de ultrassom.

Após realizar os ensaios, os dados das ondas ultrassônicas recebidas pelo transdutor e registradas pelo aparelho de ultrassom foram exportados e utilizados pelo programa desenvolvido para fornecer o tempo de percurso das ondas. Obtido os tempos, as velocidades foram calculadas de acordo com a equação 2.7.

A ideia inicial era realizar os ensaios sem antes precisar aplicar algum ciclo de carregamento nos prismas. No entanto, os resultados obtidos após o 1º ensaio com o prisma 1, apresentaram algumas incongruências. Então, com base no ensaio para determinar o módulo de elasticidade longitudinal do concreto, para o qual segundo a ABNT NBR 8522:2003 devem ser aplicados ciclos de pré-carga na amostra antes de realizar o ensaio, decidiu-se também aplicar pré-ciclos de carregamento no prisma 1 e realizar um 2º ensaio. Foram aplicados 14 ciclos e os resultados se apresentaram melhores. Os resultados dos 2 ensaios estão apresentados no item 5. A aplicação de ciclos de carga antes de realizar os ensaios pode ser justificada também pelo fato de que uma estrutura real está constantemente sujeita a carregamentos de intensidade variável como o vento, pessoas, veículos, entre outros. Então, se o ensaio com o ultrassom fosse realizado numa estrutura real, ela já teria sofrido diversos ciclos de carga e descarga anteriores. Assim, a aplicação dos ciclos de carregamento antes de realizar o ensaio conduz a um estudo com o elemento em condições mais próximas das que serão encontradas na realidade. Portanto, antes de realizar os ensaios foram aplicados 16 ciclos de carga em cada prisma.

Os ensaios para a obtenção dos módulos elásticos dinâmicos (E e G) e do coeficiente de Poisson (ν) foram realizados em cada prisma, sem tensão aplicada, antes da aplicação dos 16 ciclos de carga sobre eles. Foram emitidas ondas ultrassônicas ao longo do comprimento de cada prisma (OL₁₁ e OC₁₂) e calculadas as velocidades das ondas longitudinais (V₁₁) e de cisalhamento (V₁₂). Em seguida, estes valores foram substituídos nas equações 2.5, 2.6 e 2.3 para a obtenção das propriedades elásticas do concreto dos elementos.

3.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os equipamentos e materiais utilizados durante os ensaios e características dos 12 prismas de concreto que foram ensaiados, como os traços do concreto e o tipo de cimento e de agregados utilizados.

Foram também apresentados o objetivo dos ensaios e o procedimento experimental. O objetivo consistiu em obter o registro dos dados das ondas ultrassônicas longitudinais e de cisalhamento emitidas nas direções do eixo 1 e do eixo 2 do prisma para cada valor de força de compressão que foi aplicado sobre este elemento. O procedimento experimental foi dividido em duas etapas. Na primeira, foram registradas as ondas emitidas na direção do eixo 1 e, na segunda, foram registradas as ondas ao percorrerem o eixo 2. Os dados das ondas que foram registrados pelo aparelho de ultrassom foram exportados para o programa que foi desenvolvido neste trabalho para determinar o tempo de percurso das ondas longitudinais e de cisalhamento. A partir da obtenção do tempo, pôde ser calculada a velocidade das ondas ultrassônicas.

4 PROGRAMA COMPUTACIONAL

Neste capítulo é apresentado o programa que foi desenvolvido para fornecer os tempos de chegada (tempos de propagação ou de percurso) das ondas longitudinais e de cisalhamento a partir dos pulsos de ondas ultrassônicas registrados pelo aparelho de ultrassom durante os ensaios com os prismas de concreto. Para elaborar o programa foi utilizado o software Delphi (versão 7).

4.1 Introdução

Nos ensaios realizados nesta pesquisa foi necessário emitir ondas longitudinais e de cisalhamento nos prismas ensaiados a compressão uniaxial e determinar o tempo de percurso destas ondas para cada valor de carga aplicada nos elementos. O transdutor utilizado foi o de cisalhamento, já que ele emite os dois tipos de onda simultaneamente. Como já visto, o aparelho de ultrassom fornece apenas o tempo de percurso das ondas longitudinais. Assim, verificou-se a necessidade de desenvolver um programa para identificar o tempo em que as ondas de cisalhamento surgem na forma de onda registrada pelo aparelho de ultrassom.

Durante a pesquisa, foi constatado que o tempo de percurso das ondas longitudinais informado pelo aparelho de ultrassom quando elas eram emitidas pelo transdutor de cisalhamento era maior do que o tempo de percurso informado quando as ondas eram emitidas pelo transdutor longitudinal. Contudo, notou-se que ao aumentar os valores de ganho e / ou de voltagem de excitação na configuração do aparelho o tempo de percurso das ondas longitudinais emitidas pelo transdutor de cisalhamento diminuía, aproximando-se do valor obtido quando as ondas eram emitidas pelo transdutor longitudinal. Os tempos informados eram praticamente os mesmos quando os valores de ganho e voltagem eram máximos. No entanto, com o aumento do ganho e da voltagem de excitação a amplitude da onda é aumentada. A figura 4.1, figura 4.2 e figura 4.3 mostram pulsos de ondas registrados com diferentes configurações de ganho e / ou voltagem de excitação. Observa-se que da primeira para a terceira figura o tempo indicado diminui, 32.9 μ s, 32.4 μ s e 31.9 μ s, respectivamente. Na figura 4.3, onde os valores de ganho e voltagem são máximos, não é mais possível

identificar o trecho correspondente às ondas longitudinais e o das ondas de cisalhamento. Em resumo, a solução para se obter praticamente o mesmo tempo de percurso das ondas longitudinais emitidas pelos dois tipos de transdutores é emitir as ondas ultrassônicas pelo transdutor de cisalhamento com máximos valores de ganho e voltagem de excitação.

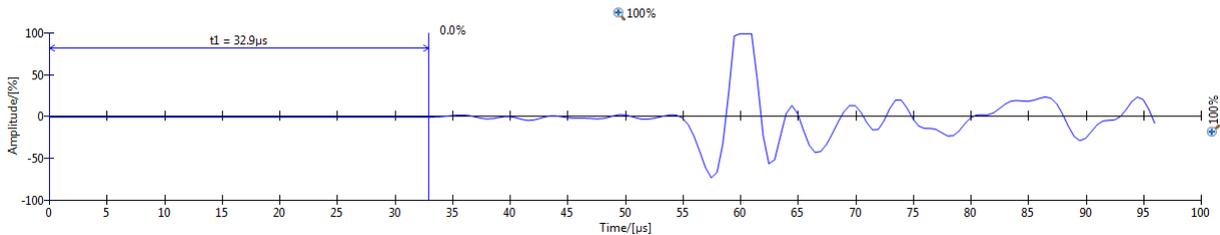


Figura 4.1 - Pulso de ondas registrado pelo aparelho e que foi emitido com ganho = 1x e voltagem de excitação = 125V.

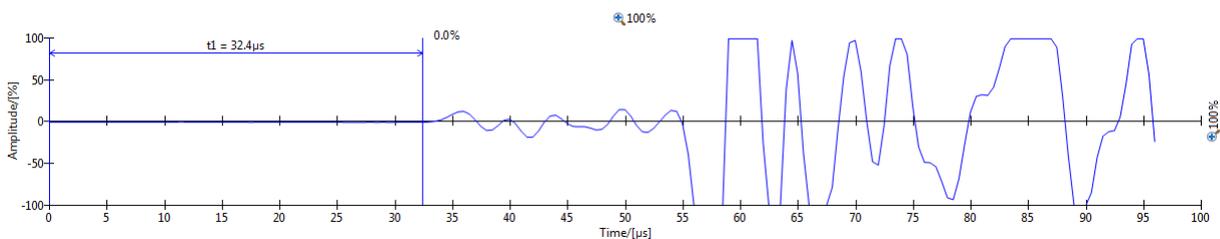


Figura 4.2 - Pulso de ondas registrado pelo aparelho e que foi emitido com ganho = 5x e voltagem de excitação = 125V.

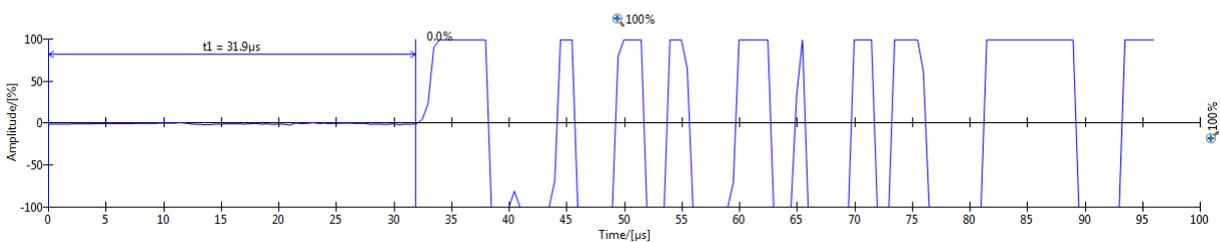


Figura 4.3 - Pulso de ondas registrado pelo aparelho e que foi emitido com ganho = 1000x e voltagem de excitação = 500V.

Porém, foram verificadas diferenças no tempo de percurso informado pelo aparelho de ultrassom. A figura 4.4 mostra a forma de onda de um pulso que foi emitido imediatamente após ao que está apresentado na figura 4.3. Os tempos informados são bastante diferentes, 27,2 μ s e 31,9 μ s, respectivamente. Assim, decidiu-se definir outro procedimento para identificar o tempo de propagação das ondas longitudinais. Portanto, de maneira a padronizar as tomadas de tempo para ondas longitudinais e de cisalhamento, verificou-se a necessidade de desenvolver um programa para automatizar estes procedimentos.

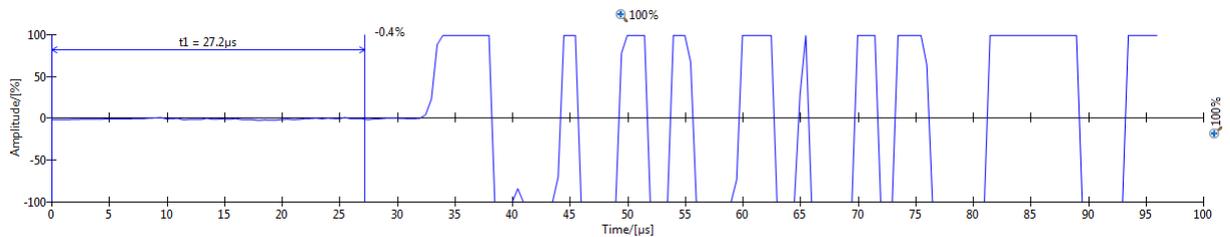


Figura 4.4 - Pulso de ondas registrado pelo aparelho com tempo de percurso de 27.2 μ s e que foi emitido com ganho = 1000x e voltagem de excitação = 500V .

Neste sentido, definiu-se que para se calcular o tempo de percurso das ondas de cisalhamento, os pulsos deviam ser emitidos com configurações baixas de ganho e voltagem de excitação, de modo que a forma de onda que era registrada pelo aparelho de ultrassom possuísse os dois trechos, de ondas longitudinais e de cisalhamento, claramente identificáveis (como na figura 4.1 ou na figura 4.2). Para se calcular o tempo de percurso das ondas longitudinais, os pulsos deviam ser emitidos com configurações máximas de ganho e voltagem de excitação, proporcionando uma forma de onda com amplitudes bastante altas, onde não se conseguisse mais diferenciar o trecho das ondas longitudinais e de cisalhamento (como na figura 4.3 ou na figura 4.4).

As figuras citadas foram geradas pelo software Pundit Link da Proceq®.

4.2 Formulação matemática

Os dados de um pulso de ondas ultrassônicas que são registrados pelo aparelho de ultrassom podem ser exportados para uma planilha do excel. Estes dados são formados por um conjunto de amplitudes do pulso fornecidas a cada 0.5 μ s e são salvos num arquivo de texto e exportados para o programa. O programa lê cada amplitude e adiciona cada valor lido numa posição de um vetor chamado “amplitude 1”. Baseado neste vetor, o programa gera um novo vetor com amplitudes para cada 0.01 μ s. Para tanto, ele executa uma interpolação linear entre dois valores consecutivos do vetor “amplitude 1”. Feito isto, obtêm-se o novo vetor “amplitude 2”. Em seguida, o programa calcula os tempos correspondentes a cada amplitude do vetor “amplitude 2” e armazena cada valor calculado num vetor denominado “tempo”. Portanto, os tempos deste vetor possuem incrementos de 0.01 μ s. Deste modo, o programa

cria um gráfico entre os valores do vetor “amplitude 2” e os valores correspondentes do vetor “tempo”. A figura 4.5 ilustra um exemplo deste gráfico.

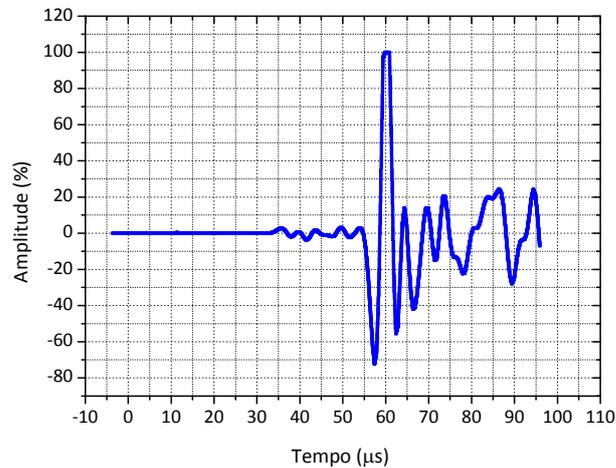


Figura 4.5 - Relação entre os elementos dos vetores “amplitude 2” e “tempo” (a cada 0.01 μs).

Com base no vetor “amplitude 2” o programa gera outro vetor chamado “absoluto” cujas posições são preenchidas com os valores absolutos do vetor “amplitude 2”. A relação entre os vetores “absoluto” e “tempo” está apresentada na figura 4.6.

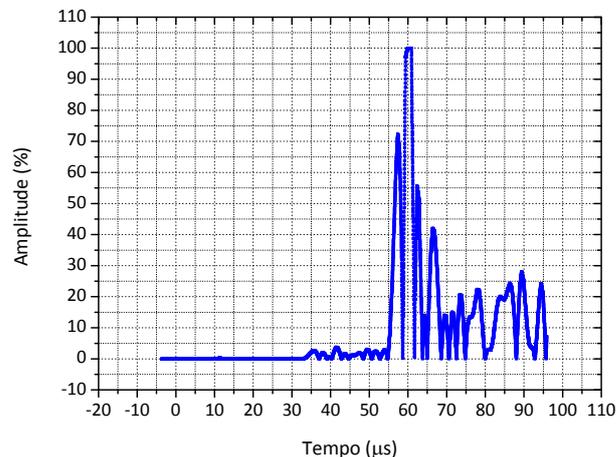


Figura 4.6 - Relação entre os elementos dos vetores “absoluto” e “tempo” (a cada 0.01 μs).

O programa também gera um vetor chamado “auxiliar” e preenche este vetor com valores nulos. Em seguida, o programa lê o vetor “absoluto” e compara o valor contido em cada posição lida (i) deste vetor com o valor contido na posição anterior a esta (i-1) do vetor “auxiliar”. Ou seja, o programa compara “absoluto [i]” com “auxiliar [i-1]”. Se, “absoluto [i]” for maior que “auxiliar [i-1]”, a posição “auxiliar [i]” recebe o valor de “absoluto [i]”. Senão,

“auxiliar [i]” recebe o valor de “auxiliar [i-1]”. Ao final deste procedimento, obtêm-se o vetor “auxiliar” com novos valores em suas posições. A relação dele com o vetor “tempo” está representada na figura 4.7.

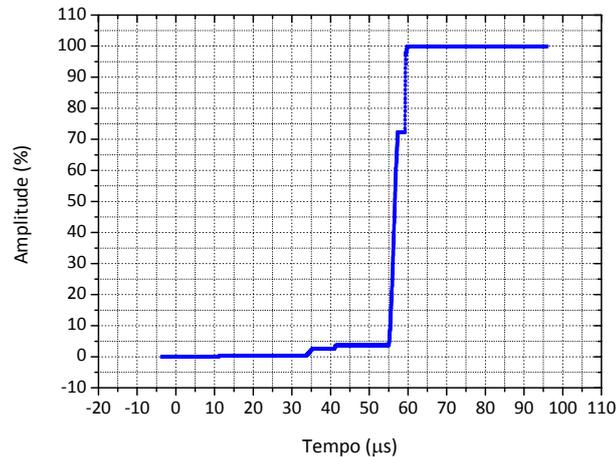


Figura 4.7 - Relação entre os elementos dos vetores “auxiliar” e “tempo” (a cada 0.01 μs).

Em seguida, o programa cria um novo vetor denominado “derivada” que contém em cada posição o valor da derivada entre dois elementos consecutivos do vetor “auxiliar”. O cálculo que o programa faz para preencher as posições do vetor “derivada” é apresentado na equação 4.1. Ao terminar este procedimento, obtêm-se o vetor “derivada” cuja relação com o vetor “tempo” é dada pela figura 4.8.

$$derivada[i] = \frac{(auxiliar[i + 1] - auxiliar[i])}{0.01} \quad (4.1)$$

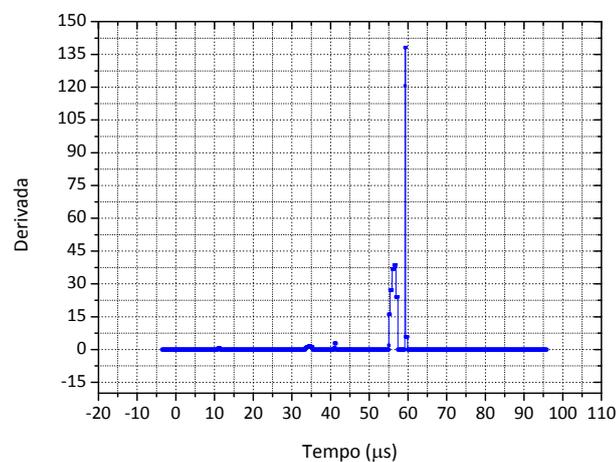


Figura 4.8 - Relação entre os elementos dos vetores “derivada” e “tempo” (a cada 0.01 μs).

O programa identifica o número de conjuntos de derivadas não nulas consecutivas que existe no vetor “derivadas”. O número mínimo de derivadas consecutivas não nulas para formar um conjunto é 2. Em seguida, o programa identifica o tempo correspondente à primeira derivada não nula de cada conjunto e atribui estes valores de tempo a um vetor denominado “tempo 2”. Ao final deste procedimento, o vetor “tempo 2” contém os tempos referentes à primeira derivada de cada conjunto encontrado no vetor ”derivadas”. O programa gera uma interface gráfica onde é apresentado o gráfico que relaciona os vetores “amplitude 2” com o “tempo”. O programa também gera uma linha vertical vermelha cruzando este gráfico em cada valor de tempo presente no vetor “tempo 2”. A figura 4.9 mostra um exemplo desta interface.

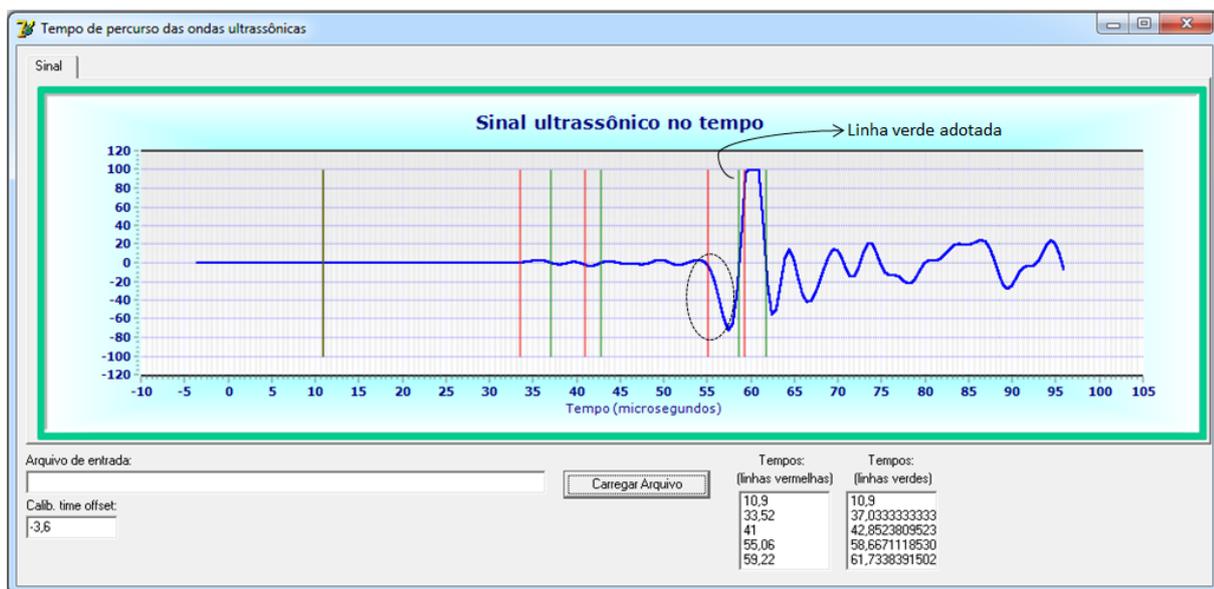


Figura 4.9 - Interface do programa para determinar o tempo de chegada das ondas de cisalhamento no pulso de ondas emitido no prisma sem tensão.

Nesta figura, observa-se a presença de linhas verdes também. Para cada linha vermelha existe a direita uma linha verde correspondente. Estas linhas verdes são geradas pelo programa para indicar o tempo em que o gráfico em azul intercepta o eixo horizontal, pela 1ª vez, após a linha vermelha. Para identificar este tempo, o programa toma como referência a amplitude correspondente ao tempo indicado por cada linha vermelha. A partir desta amplitude, o programa realiza verificações a cada duas amplitudes consecutivas (“amplitude[i]” e “amplitude[i+1]”):

a) Primeiro o programa verifica se a multiplicação entre as duas amplitudes é negativa (equação 4.2). Se for, significa que entre estas amplitudes está aquela cujo valor é zero, ou seja, que intercepta o eixo horizontal. A figura 4.10 ilustra esta situação. O programa identifica o tempo correspondente à amplitude nula e cria uma reta vertical verde neste local do gráfico “amplitude 2 x tempo”. Para identificar o tempo da amplitude nula é realizada uma interpolação linear entre a “amplitude[i]” e a “amplitude[i+1]” .

$$\text{amplitude}[i] * \text{amplitude}[i+1] \quad (4.2)$$

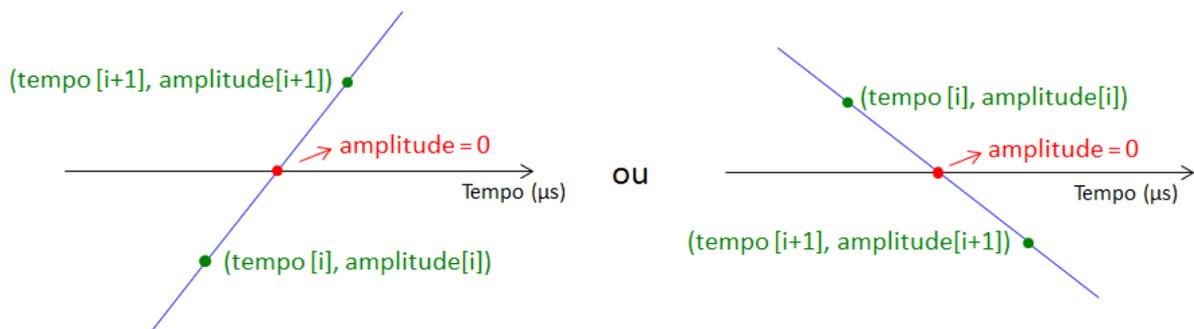


Figura 4.10 - Amplitude nula entre duas amplitudes consecutivas (com sinais opostos) contidas no vetor “amplitude 2”.

b) Se a condição anterior não for atendida, o programa verifica se o valor da primeira amplitude (“amplitude[i]”) é nulo. Se for, o tempo correspondente a esta amplitude é identificado e é criada uma reta vertical verde interceptando este tempo no gráfico “amplitude 2 x tempo”.

c) Se a condição anterior também não for atendida, o programa verifica se a segunda amplitude (“amplitude[i+1]”) é nula. Se for, o programa gera uma linha vertical verde cruzando o gráfico no tempo correspondente a esta amplitude.

Portanto, a partir do instante em que uma destas condições é atendida, o programa consegue identificar o tempo correspondente à amplitude nula logo após a reta vermelha de referência. O programa repete este procedimento para identificar este tempo após cada linha vermelha. Ao final do procedimento, é criada uma reta verde para cada reta vermelha.

O programa também apresenta em sua interface os tempos correspondentes a cada reta vermelha e verde nas lacunas “Tempos (linhas vermelhas)” e “Tempos (linhas verdes)”,

respectivamente (figura 4.9). Ao clicar em algum valor destas lacunas, a reta correspondente engrossa. Assim, é possível saber qual é o tempo indicado por cada reta.

Foi desenvolvido outro programa que executa os mesmos procedimentos descritos no programa anterior, mas para quantos pulsos de ondas o usuário quiser. Os dados de cada pulso são inseridos num único arquivo de texto que é lido pelo programa. Este programa gera listas num arquivo de texto contendo os tempos das linhas vermelhas e das linhas verdes de cada pulso de ondas que é lido. No entanto, ele não fornece o gráfico com o desenho destas linhas para cada pulso.

4.3 Interface gráfica

Cada reta vermelha indica um possível tempo de início das ondas de cisalhamento na figura 4.9 e um possível tempo de início das ondas longitudinais na figura 4.11. Cabe ao usuário do programa identificar a reta vermelha que está localizada na região onde claramente cada tipo de onda surge. Nestas figuras, fica claro que as ondas de cisalhamento e longitudinais iniciam na região que está circulada em preto.

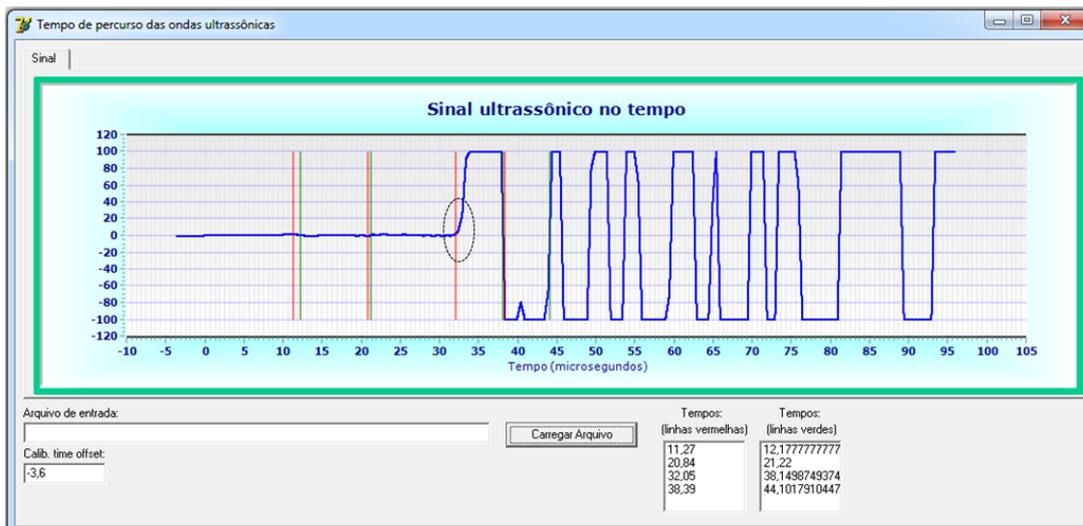


Figura 4.11 - Interface do programa com os possíveis tempos de percurso das ondas longitudinais presentes no pulso de ondas emitido no prisma sem tensão.

O tempo de percurso das ondas longitudinais no prisma sem tensão foi obtido localizando a linha vermelha na região de interesse em cada pulso de onda registrado. Os tempos indicados por cada reta vermelha e verde variaram muito pouco entre cada valor de tensão que foi aplicada no prisma. Portanto, uma vez executado o primeiro programa e identificado o tempo de chegada das ondas longitudinais para o prisma sem tensão, o tempo de chegada destas ondas para cada valor de tensão aplicada pôde ser facilmente identificado nas listas (fornecidas pelo segundo programa) que continham os valores das linhas vermelhas de cada pulso emitido para cada valor de tensão. Em resumo, para obter o tempo de chegada das ondas longitudinais no prisma, primeiramente rodou-se o primeiro programa com o objetivo de identificar o tempo de chegada destas ondas no prisma sem tensão. Após, executou-se o segundo programa e os tempos de chegada das ondas longitudinais foram identificados na lista de valores que foi gerada para cada nível de tensão aplicada no prisma.

Para obter o tempo de percurso das ondas de cisalhamento no prisma sem tensão o procedimento adotado foi o mesmo para determinar o tempo de chegada das ondas longitudinais no prisma descarregado: Rodou-se o primeiro programa e, na interface gerada, foi identificada a reta vermelha localizada na região onde surgiu a onda de cisalhamento. No entanto, o procedimento adotado para obter o tempo de chegada das ondas de cisalhamento emitidas no prisma submetido a diferentes valores de tensão foi diferente. Para entender o motivo, primeiramente deve-se observar a figura 4.12. Esta figura mostra as formas de onda obtidas no mesmo local de um prisma de concreto para diferentes valores de carregamento aplicado sobre ele. Para cada valor de carga aplicado a forma de onda possui uma cor diferente (ver legenda da figura). A figura 4.13 mostra a ampliação de um trecho da figura 4.12 que inclui a região onde as ondas de cisalhamento se iniciam.

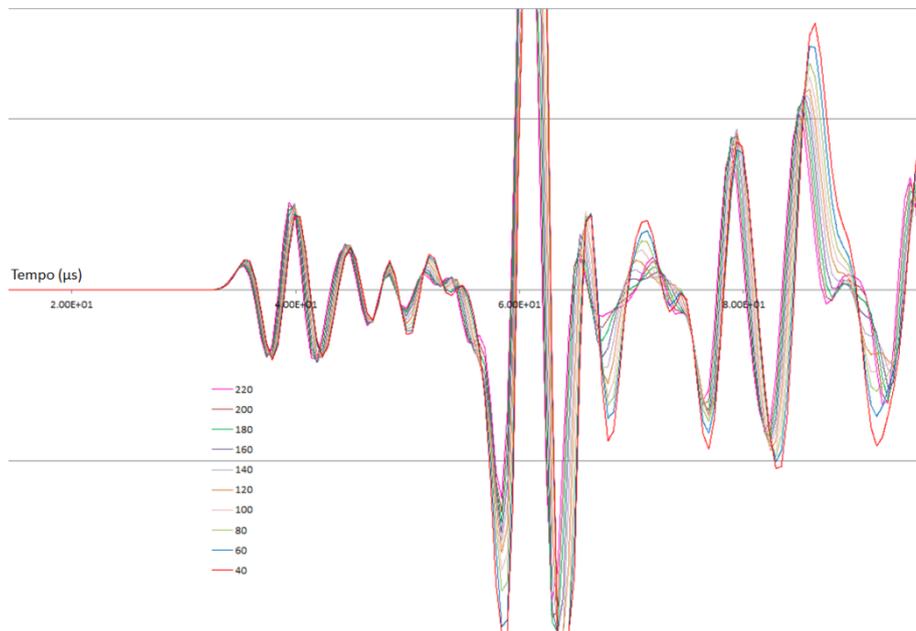


Figura 4.12 - Formas de onda para diferentes valores de força aplicada (em kN).

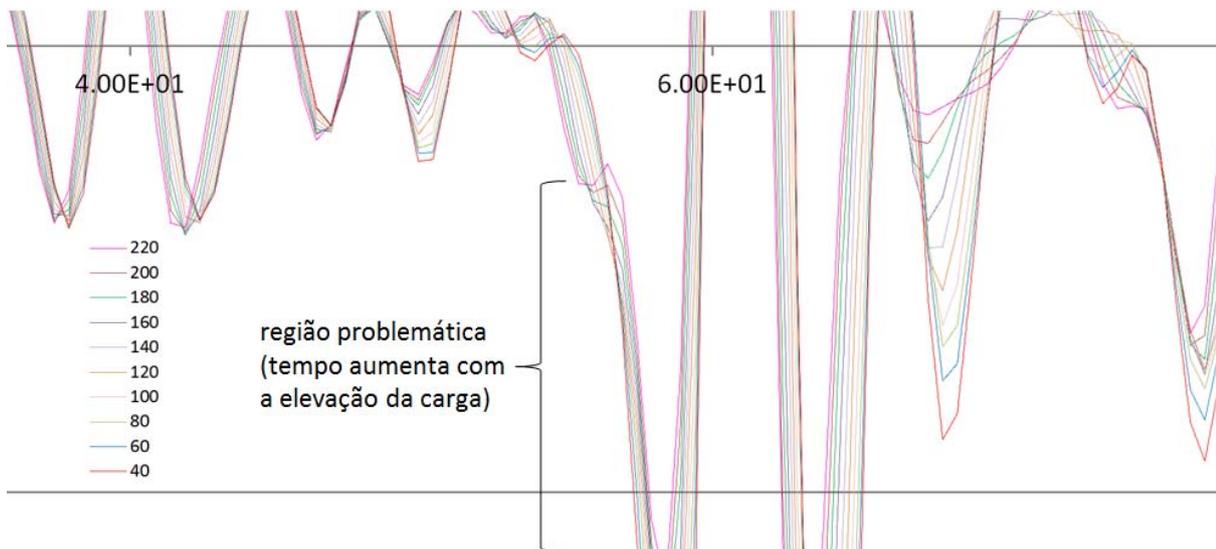


Figura 4.13 - Ampliação do trecho onde as ondas de cisalhamento se iniciam.

Observou-se o aparecimento de uma perturbação na forma da onda na região em que as ondas de cisalhamento surgiram conforme o aumento da tensão de compressão aplicada. Com exceção da parte perturbada, o gráfico se deslocou para a esquerda conforme o aumento da tensão de compressão aplicada no elemento, ou seja, o tempo de percurso das ondas diminuiu. No entanto, no trecho perturbado ocorreu o contrário, o gráfico se deslocou para a direita com o aumento da tensão. Foi feita uma análise em todo o gráfico e verificou-se que o

seu deslocamento para a direita ocorreu apenas naquele trecho. Então, se o tempo de chegada das ondas de cisalhamento, que é fornecido pelo programa, estiver contido no local problemático, o programa irá fornecer tempos cada vez maiores conforme ocorrer o aumento de carga no prisma. Para evitar este erro, o tempo de chegada das ondas de cisalhamento emitidas quando o prisma estava carregado não foi obtido por meio da linha vermelha localizada na região onde surgiu a onda de cisalhamento. Mas, por meio da linha verde correspondente a esta linha vermelha (a linha verde correspondente é a primeira que aparece a direita desta linha vermelha como indicado na figura 4.9). Isto porque, esta linha verde está localizada numa região onde já existem ondas de cisalhamento e onde não surgem perturbações com o aumento da tensão. Então, a partir do primeiro valor de tensão aplicada no prisma, o tempo de percurso das ondas de cisalhamento foi calculado com base na variação de tempo que a linha verde adotada sofreu quando foi aplicado o incremento de tensão. Assim, após a aplicação do 1º incremento de tensão no prisma, a variação que ocorreu no tempo desta linha verde foi somada ao tempo de percurso que foi obtido quando o elemento estava descarregado, obtendo-se o tempo de percurso da onda no prisma carregado com o 1º valor de carga. Para obter o tempo de percurso no elemento carregado com o 2º valor de carga, foi calculada a nova variação do tempo da linha verde ao aplicar o 2º incremento de carga no elemento. Esta variação foi somada ao tempo de percurso obtido para a carga anterior (1º valor de carga). Este procedimento foi repetido para obter o tempo de percurso das ondas de cisalhamento para os demais valores de carga aplicados no elemento. Ao adotar este procedimento para obter o tempo de chegada das ondas de cisalhamento quando o prisma estava carregado, evitou-se obter tempos de percurso equivocados, caso as retas vermelhas que os indicam estivessem situadas na região perturbada.

Em resumo, o tempo de percurso das ondas de cisalhamento foi obtido de duas maneiras:

1ª) Prisma descarregado: rodou-se o primeiro programa e identificou-se a reta vermelha na região em que surgiu a onda de cisalhamento. O tempo indicado por esta reta foi o tempo de chegada da onda de cisalhamento no prisma sem tensão. Também foi identificado o tempo referente à 1ª reta verde a direita desta reta vermelha, pois a variação do tempo da reta verde seria utilizada para calcular o tempo de chegada das ondas de cisalhamento quando o prisma estivesse carregado com o primeiro valor de carga.

2ª) Prisma carregado: rodou-se o segundo programa e foi identificado o tempo referente a reta verde adotada para cada valor de carga aplicada no prisma. O tempo de percurso da onda de cisalhamento para cada carga foi calculado baseado na variação de tempo que esta reta verde sofreu quando o incremento de carga foi aplicado. Para tanto, esta variação foi somada ao tempo de percurso encontrado para a carga anterior.

O aparecimento de perturbações na região onde as ondas de cisalhamento surgem não é um padrão. Isto pode ocorrer ou não. Mas, no caso de ocorrer, não existe o risco de obter uma análise errada dos tempos de percurso quando ele é obtido de acordo com este procedimento.

4.4 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os motivos para se desenvolver o programa computacional, o seu desenvolvimento utilizando o software Delphi (versão 7), seu funcionamento e os procedimentos que foram adotados para obter os tempos de percurso das ondas longitudinais e de cisalhamento nos prismas sem tensão e com tensão aplicada.

5 RESULTADOS

Os resultados dos estudos realizados com os 12 prismas de concreto são apresentados neste capítulo. Com base na análise dos resultados é discutido o comportamento acustoelástico do concreto e sugerido um procedimento para estimar a tensão mínima numa estrutura real.

Coeficientes de variação dos tempos de propagação das ondas ultrassônicas

Nos ensaios para analisar a influência da tensão do material na velocidade das ondas ultrassônicas, os valores de tempo de propagação obtidos para os 10 pulsos de ondas ultrassônicas emitidas para um mesmo valor de carga aplicado no prisma não foram iguais. As variações entre os 10 valores foram menores quando as ondas emitidas foram de cisalhamento e maiores quando as ondas emitidas foram longitudinais. Para determinar um único valor de tempo referente a cada nível de tensão no prisma foi calculada a média entre os 10 valores obtidos. Foi determinado o coeficiente de variação (c.v.) referente aos 10 valores de tempo de propagação obtidos para cada valor de força aplicada. A tabela 5.1 apresenta os valores destes coeficientes para cada tipo de onda ultrassônica emitida no prisma 4.

Tabela 5.1 - Coeficientes de variação para os 10 valores de tempo de propagação obtidos ao emitir cada tipo de onda no prisma submetido a diferentes valores de força de compressão.

c.v.(%)				
Carga (kN)	OC ₁₂	OL ₁₁	OC ₂₁	OL ₂₂
0	0.001	0.363	0.005	0.524
20	0.001	0.191	0.003	0.430
40	0.001	0.282	0.005	0.320
60	0.002	0.385	0.004	0.319
80	0.002	0.356	0.004	0.567
100	0.001	0.248	0.004	0.294
120	0.002	0.158	0.003	0.639
140	0.002	0.247	0.002	0.396
160	0.002	0.207	0.006	0.279
180	0.001	0.284	0.004	0.215
200	0.001	0.259	0.004	0.166
220	0.001	0.275	0.003	0.210
240	0.002	0.261	0.002	0.243

Caracterização dos prismas utilizados nos ensaios

A densidade (ρ), resistência média a compressão aos 28 dias (f_c), módulo de elasticidade longitudinal dinâmico (E), módulo de elasticidade transversal dinâmico (G) e o coeficiente de Poisson (ν) do concreto de cada prisma estão apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Valores de densidade, resistência média a compressão, módulos de elasticidade dinâmicos e de coeficiente de Poisson determinados para os 12 prismas.

Prisma	ρ (kg/m ³)	f_c (MPa)	E (GPa)	G (GPa)	ν
P1	2457,78	49,52	45,70	18,45	0,24
P2	2435,56	49,52	42,51	16,94	0,25
P3	2400,00	49,52	41,98	17,52	0,20
P4	2431,11	52,39	42,42	17,52	0,21
P5	2404,44	43,25	40,01	16,49	0,21
P6	2373,33	30,28	38,39	15,85	0,21
P7	2444,44	50,35	41,23	16,95	0,22
P8	2373,33	29,08	38,85	16,10	0,21
P9	2404,44	39,61	40,59	16,75	0,21
P10	2386,67	23,91	36,97	15,26	0,21
P11	2408,89	43,39	42,21	17,02	0,24
P12	2391,11	46,06	39,51	16,29	0,21

Avaliação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas considerando ou não a deformação do prisma

O cálculo da velocidade das ondas foi feito desprezando-se a deformação do prisma devido ao carregamento. Ou seja, o comprimento foi considerado 0,50 m para qualquer valor de carga aplicada. Esta adoção poderia gerar uma dúvida. Como se considerou o ΔS constante entre os carregamentos, será que o aumento de velocidade não ocorreu apenas pelo fato de que o tempo de propagação da onda sofreu redução com o encurtamento do prisma?

Para mostrar que a redução do tempo também ocorreu por conta do aumento de tensão no prisma, tomou-se como exemplo o ensaio realizado com o prisma 2 e foi elaborado o gráfico em vermelho da figura 5.1 utilizando o ΔS real para o cálculo das velocidades (V_{11}), ou seja, considerando o encurtamento do prisma. Este gráfico relaciona a variação relativa da velocidade no prisma ($\Delta V/V_0$ onde V_0 é a velocidade no elemento sem tensão aplicada) com o a tensão aplicada uniaxialmente que foi calculada pela divisão entre a força aplicada e a área

total da seção transversal do prisma ($0,0225 \text{ m}^2$). Se a velocidade não sofresse influência da tensão ela deveria ser constante com o aumento do carregamento, afinal, o material é o mesmo. Ou seja, o ΔS e o Δt iriam diminuir na mesma proporção. Como houve aumento da velocidade, isto significa que algo fez o tempo diminuir numa proporção maior do que a da diminuição do ΔS . O agente que fez isto foi a tensão. Fica assim, comprovado que, ao carregar o prisma, não é apenas a redução do ΔS que provoca diminuição no tempo de propagação da onda (para manter a velocidade constante, afinal o material é o mesmo), mas também o acréscimo de tensão no material.

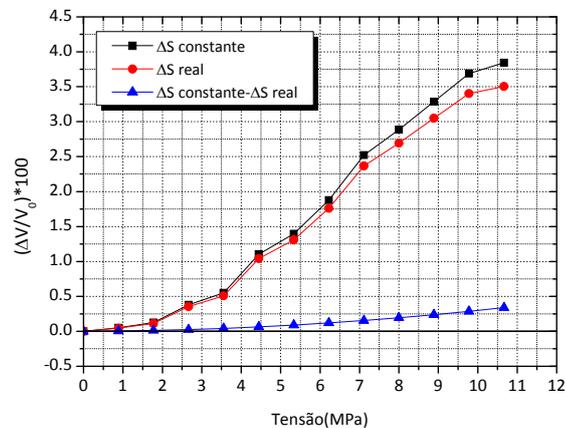


Figura 5.1 - Variação relativa da velocidade V_{11} em função da tensão uniaxial de compressão aplicada no prisma 2 considerando o ΔS real e o ΔS constante.

Avaliação do efeito de pré-ciclos na realização dos ensaios

A seguir, são analisados os resultados obtidos para o 1º, 2º e 3º ensaios realizados com o prisma 1 no qual foram aplicados diferentes números de ciclos de carga antes de realizar cada ensaio. O número de ciclos de carregamento aplicados no prisma 1 é o seguinte: 1º ensaio (2 ciclos) + 14 ciclos + 2º ensaio (2 ciclos) + 21 ciclos + 3º ensaio (2 ciclos).

A figura 5.2 a figura 5.5 apresentam os gráficos da variação relativa das velocidades em função da tensão para os 3 ensaios.

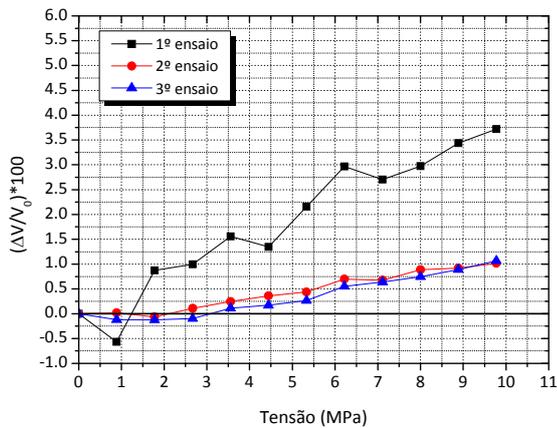


Figura 5.2 - Variação relativa da V_{11} em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 1 no 1º, 2º e 3º ensaios.

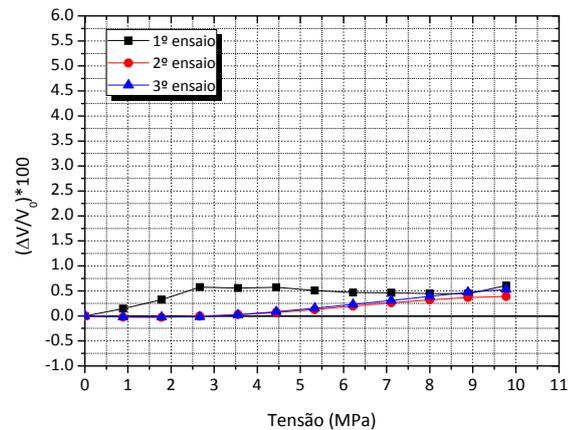


Figura 5.3 - Variação relativa da V_{12} em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 1 no 1º, 2º e 3º ensaios.

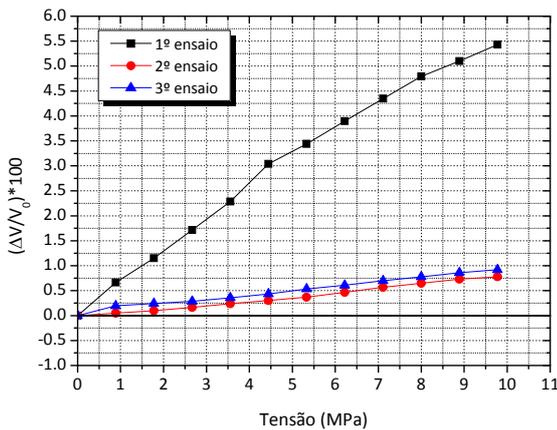


Figura 5.4 - Variação relativa da V_{21} em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 1 no 1º, 2º e 3º ensaios.

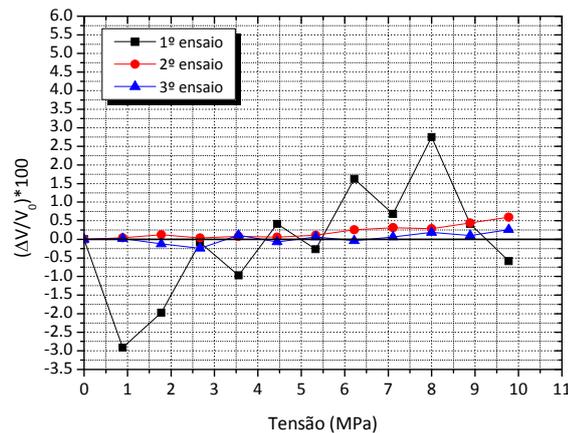


Figura 5.5 - Variação relativa da V_{22} em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 1 no 1º, 2º e 3º ensaios.

No 1º ensaio, notou-se um comportamento inesperado das OL_{11} (figura 5.2), pois elas apresentaram menor variação relativa da velocidade em relação as OC_{21} (figura 5.4). Na realidade, as OL_{11} são as ondas que possuem maior sensibilidade acustoelástica, como será observado adiante nas análises das figuras 5.6 a 5.17. Outro comportamento anômalo durante o 1º ensaio foi o das OC_{12} durante praticamente todo o carregamento (figura 5.3), visto que a partir de um determinado nível de tensão as velocidades praticamente não se alteraram e, em seguida, começaram a diminuir.

No entanto, nos 2º e 3º ensaios, as OC_{12} apresentaram um comportamento melhor (figura 5.3), pois a velocidade destas ondas aumentou na maior parte do ensaio. Além disto, as OL_{11} passaram a ter a maior variação relativa da velocidade entre os demais tipos de onda. A

partir desta análise, concluiu-se que é melhor aplicar ciclos de carga antes de realizar os ensaios com os prismas a fim de se obter melhores resultados. O número de ciclos ficou definido como 16, que foi a quantidade aplicada antes de realizar o 2º ensaio, pois a aplicação de mais ciclos praticamente não mudou o comportamento das curvas. Isto foi observado ao comparar as curvas em azul, referentes ao 3º ensaio, com as em vermelho, referentes ao 2º ensaio, na figura 5.2 a figura 5.5.

Avaliação do comportamento acustoelástico de prismas de concreto com diferentes propriedades mecânicas

Os resultados dos ensaios com os 12 prismas, realizados após terem sido aplicados 16 ciclos de carga em cada prisma (com exceção do prisma 11), estão apresentados nos gráficos das figuras 5.6 a 5.17. O prisma 11 rompeu durante o 1º ensaio realizado sem que antes tivesse sido aplicado algum ciclo de carga, pois, até então, não havia sido concluída a necessidade de aplicação dos ciclos.

Nas figuras 5.6 a 5.17, o valor que aparece ao final de cada curva é a variação da velocidade da onda ultrassônica em m/s quando o prisma está submetido ao último valor de carregamento. Nestas figuras, também é informado o valor do f_c de cada prisma. Estas informações também estão apresentadas na tabela 5.3 juntamente com a tensão máxima aplicada em cada prisma em porcentagem do f_c .

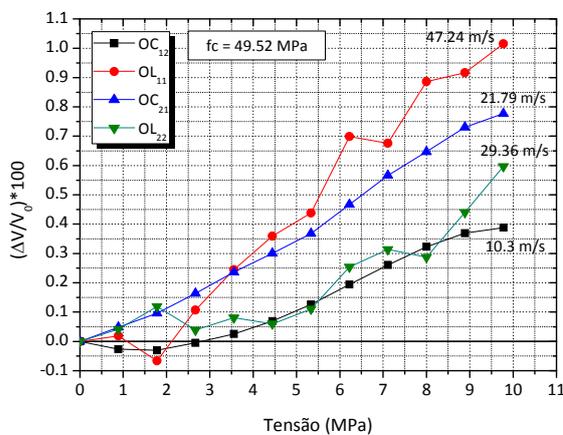


Figura 5.6 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 1.

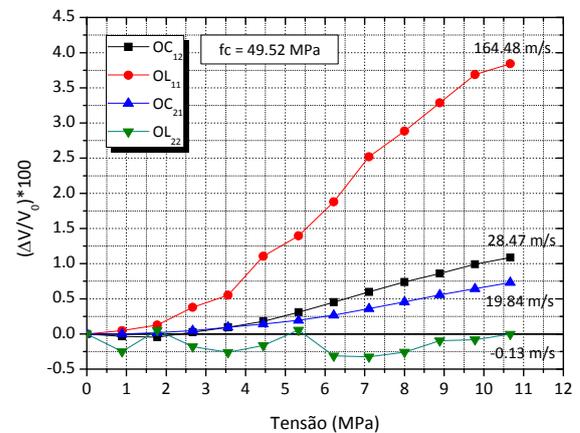


Figura 5.7 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 2.

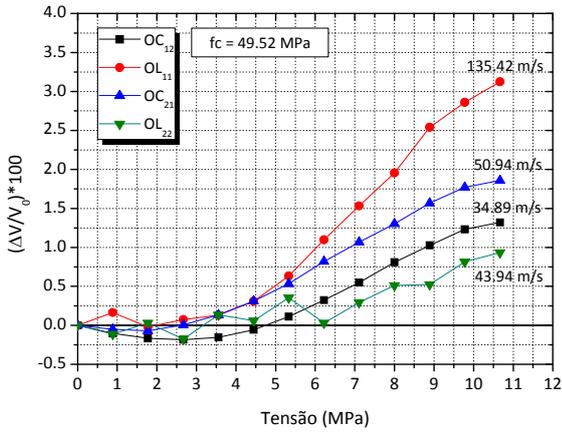


Figura 5.8 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 3.

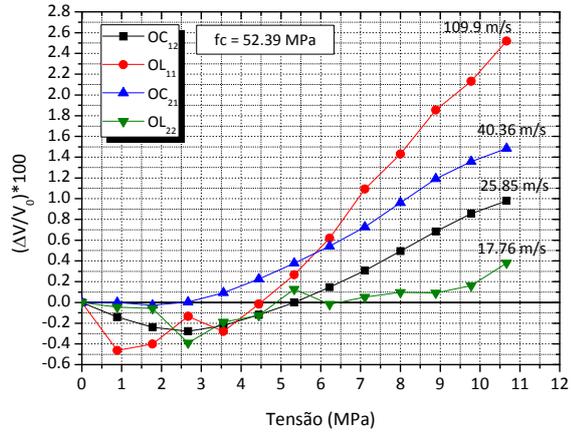


Figura 5.9 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 4.

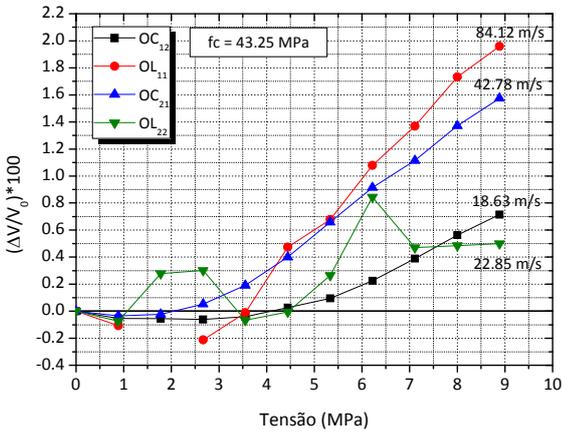


Figura 5.10 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 5.

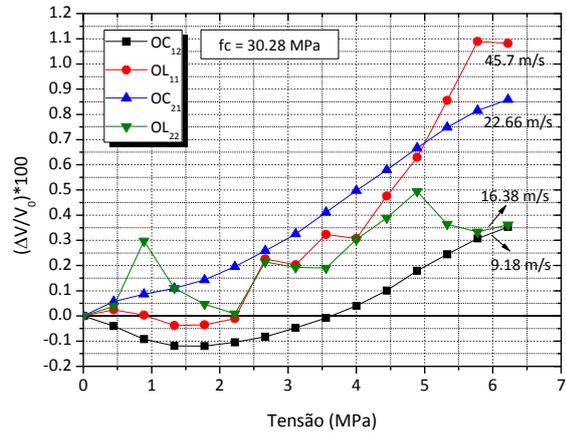


Figura 5.11 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 6.

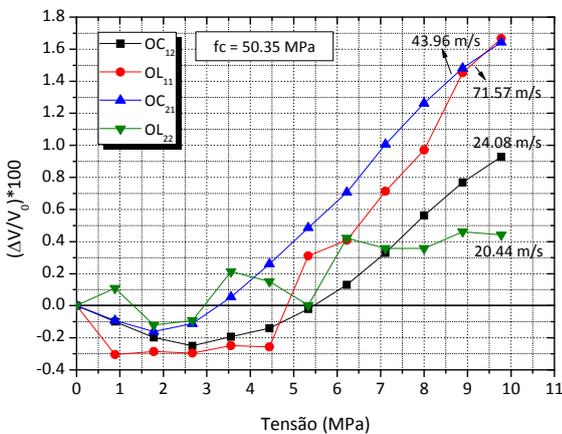


Figura 5.12 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 7.

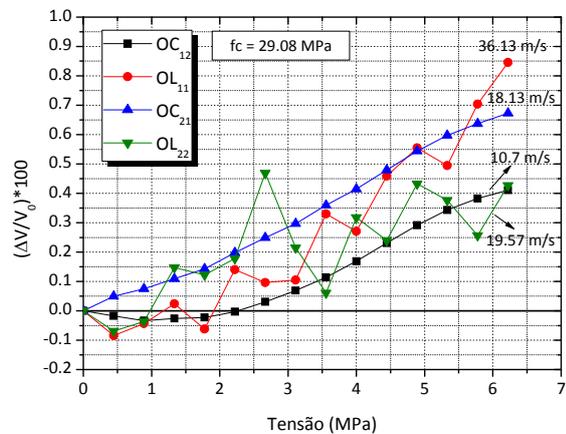


Figura 5.13 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 8.

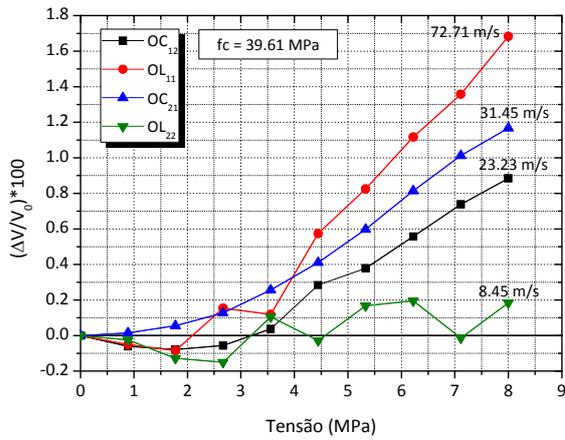


Figura 5.14 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 9.

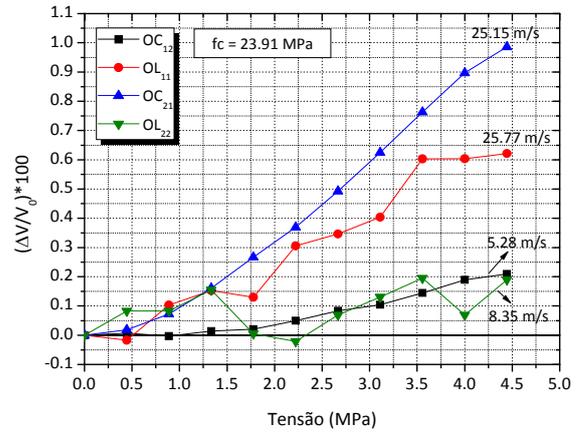


Figura 5.15 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 10.

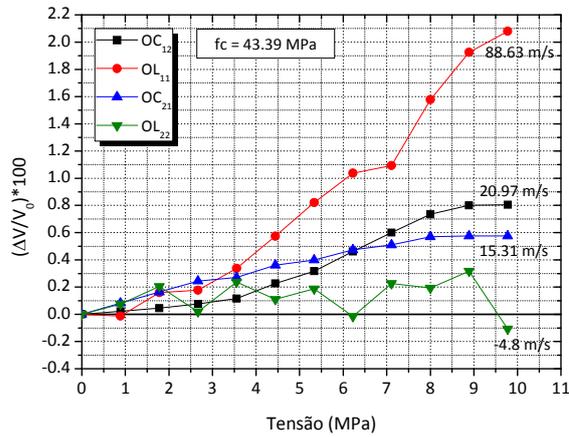


Figura 5.16 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 11.

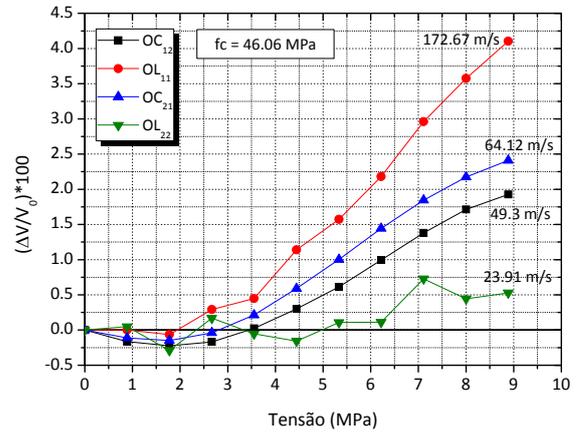
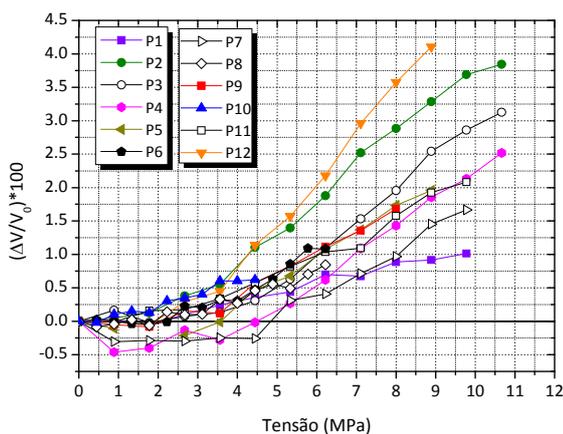
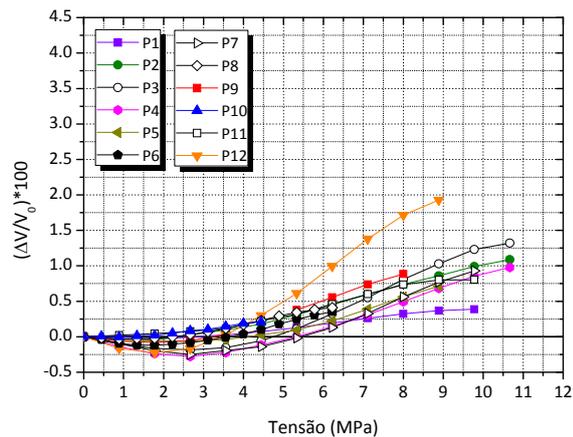


Figura 5.17 - Variação relativa das velocidades em função da tensão uniaxial aplicada no prisma 12.

Tabela 5.3 - Variação das velocidades em cada prisma para o último valor de carregamento aplicado e tensão máxima de compressão aplicada em porcentagem do f_c .

Prismas	f_c (MPa)	Tensão _{máx} *100/ f_c (%)	ΔV (m/s)			
			OC ₁₂	OL ₁₁	OC ₂₁	OL ₂₂
P1	49.52	19.75	10.3	47.24	21.79	29.36
P2	49.52	21.54	28.47	164.48	19.84	-0.13
P3	49.52	21.54	34.89	135.42	50.94	43.94
P4	52.39	20.36	25.85	109.9	40.36	17.76
P5	43.25	20.55	18.63	84.12	42.78	22.85
P6	30.28	20.55	9.18	45.7	22.66	16.38
P7	50.35	19.42	24.08	71.57	43.96	20.44
P8	29.08	21.40	10.7	36.13	18.13	19.57
P9	39.61	20.20	23.23	72.71	31.45	8.45
P10	23.91	18.59	5.28	25.77	25.15	8.35
P11	43.39	22.54	20.97	88.63	15.31	-4.8
P12	46.06	19.30	49.3	172.67	64.12	23.91

Cada uma das figuras 5.18 a 5.21 apresenta, simultaneamente, as curvas da variação relativa da velocidade de um mesmo tipo de onda em função da tensão para todos os prismas, facilitando a comparação entre eles. Por causa da baixa resistência a compressão de alguns prismas (6, 8 e 10) em relação aos demais, a tensão máxima que pôde ser aplicada neles também foi baixa e isto fica claro ao observar onde termina a curva referente a cada prisma.

Figura 5.18 - Variação relativa da V_{11} em função da tensão uniaxial aplicada nos prismas 1 a 12.Figura 5.19 - Variação relativa da V_{12} em função da tensão uniaxial aplicada nos prismas 1 a 12.

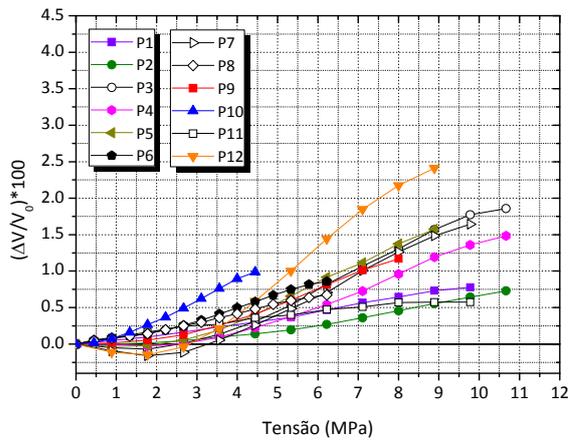


Figura 5.20 - Variação relativa da V_{21} em função da tensão uniaxial aplicada nos prismas 1 ao 12.

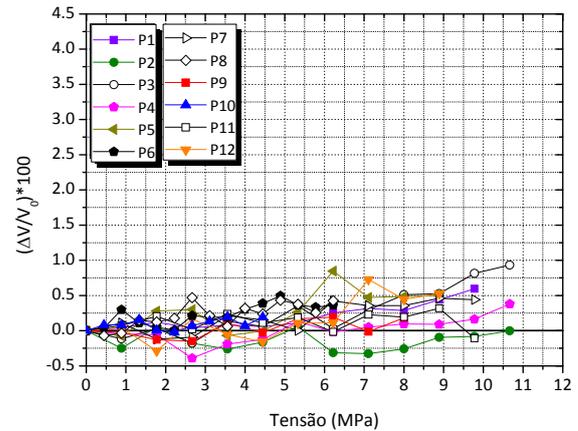


Figura 5.21 - Variação relativa da V_{22} em função da tensão uniaxial aplicada nos prismas 1 ao 12.

Em todos os gráficos das figuras 5.6 a 5.17 ficou evidente o aumento da velocidade das ondas conforme o aumento da tensão uniaxial de compressão no prisma.

No prisma 4 (figura 5.9), a máxima variação relativa da velocidade das ondas OC_{12} foi 1% e o maior c.v. para este tipo de onda foi 0.002 % (tabela 5.1). Este valor é pequeno comparado a variação relativa de velocidade de 1%. Para as ondas OL_{11} e OC_{21} , os maiores valores de c.v., 0.385% e 0.006% respectivamente, também são pequenos em relação às máximas variações relativas das velocidades destas ondas, de 2.5% e 1.5%, respectivamente. No entanto, o mesmo não foi verificado para as ondas OL_{22} . Nestas, o máximo valor da variação relativa da velocidade, 0.4%, e o maior valor do c.v., 0.639%, possuem a mesma ordem de grandeza. Portanto, não se pode afirmar que a variação relativa de velocidade encontrada para as ondas OL_{22} ocorreu devido ao efeito acustoelástico. As mesmas conclusões foram obtidas para os demais prismas estudados.

As OL_{22} apresentaram variação de velocidade muito pequena quando comparada com os demais tipos de ondas e em alguns casos esta variação não pôde ser observada (prismas 2 e 11). No entanto, a variação notada não pode ser atribuída ao efeito acustoelástico, como explicado no parágrafo anterior. Provavelmente, se a precisão do programa desenvolvido para fornecer o tempo de chegada das ondas fosse maior do que $0,01\mu s$, a variação da velocidade das ondas longitudinais emitidas na direção 2 seria mais evidente. Outra alteração que também poderia resultar neste efeito seria na dimensão do prisma. Para exemplificar isto, foi feito um estudo com o prisma 4. Cada linha da tabela 5.4 mostra qual seria a variação de tempo de percurso das ondas ultrassônicas quando fosse aplicado sobre o prisma 4 (sem tensão) o último valor de tensão de compressão uniaxial do ensaio (10.68 MPa), para

diferentes distâncias de percurso das ondas, ou seja, diferentes dimensões do prisma. Observou-se crescimento na variação do tempo de propagação das ondas com o aumento da dimensão do elemento na direção de percurso das ondas. Isto sugere que certa variação na velocidade da onda poderia ser identificada por meio de programas que fornecessem o tempo com menor precisão caso fosse aumentada suficientemente a dimensão do elemento na direção de propagação das ondas.

Tabela 5.4 - Variação no tempo de percurso para cada tipo de onda ultrassônica emitida em diferentes dimensões do prisma 4 quando é aplicado um valor de tensão de 10.68 MPa no prisma sem tensão.

ΔS (m)	$\Delta t_{(0 - 10.68 \text{ MPa})}$ (μs)			
	OC₁₂	OL₁₁	OC₂₁	OL₂₂
0.15	0.55	0.84	0.81	0.12
0.3	1.1	1.69	1.61	0.25
0.5	1.84	2.81	2.69	0.4
1	3.68	5.64	5.38	0.8

Com exceção do que foi observado no prisma 10 (figura 5.15), o tipo de onda que apresentou maior variação na velocidade foi a OL₁₁. Este prisma possui baixa resistência à compressão (23.91 MPa), a menor entre os 12 prismas. Deste modo, a carga máxima que pôde ser aplicada sobre ele foi pequena (100 kN). Nos demais prismas (com exceção do prisma 2), em que a carga final aplicada foi mais alta, observou-se que de 0 MPa até um determinado valor de tensão, as curvas das OL₁₁ não estavam acima de todas as outras curvas (ver figuras 5.6 , 5.8 a 5.14, 5.16 e 5.17). Somente a partir deste determinado valor de tensão atingida no prisma, elas passaram a estar acima das demais e continuaram assim. O que pôde ser visualizado na figura 5.15 foi referente apenas ao trecho correspondente a baixos valores de tensões no prisma 10, que foram até 4.5 MPa, aproximadamente. Nos prismas 4, 6, 7 e 8, a curva referente à OL₁₁ ficou acima das demais somente para valores maiores que 4.5 MPa. Portanto, provavelmente foi por conta dos baixos níveis de tensão no prisma 10 que a OL₁₁ não apresentou a maior variação.

Depois das OL₁₁, as OC₂₁ apresentaram a maior variação da velocidade com o aumento da tensão na maioria dos prismas. Isto só não ocorreu para os prismas 2 e 11 (figuras 5.7 e 5.16) . Imagina-se que este resultado seja apenas uma dispersão.

Nas figuras 5.6 a 5.17 notou-se a presença de um trecho não linear no início do carregamento para as curvas referentes às OC₁₂. As curvas correspondentes as OL₁₁ só não

apresentaram este trecho nos prismas 10 e 11 (ver figuras 5.15 e 5.16) e as referentes às OC₂₁ não o apresentaram para os prismas 1, 6, 8 e 11 (ver figuras 5.6, 5.11, 5.13 e 5.16). Este comportamento não corresponde ao fenômeno acustoelástico representado pela equação 2.16, segundo a qual, a relação entre a variação relativa da velocidade da onda ultrassônica e a tensão no material é linear. Como mencionado anteriormente, os autores Chaki e Bourse (2009) também encontraram este comportamento para as OL₁₁ ao emití-las na extremidade de uma cordoalha de aço submetida a diferentes valores de tração (figura 2.19). Os autores levantaram as seguintes possibilidades para explicar este comportamento discrepante: fortes forças de contato entre os fios individuais da cordoalha no intervalo de tensão de 0 à 600 MPa; tensões residuais pré-existentes nas cordoalhas; defeitos existentes ou a interação entre estas hipóteses. A primeira hipótese pode ficar descartada, pois explicaria um comportamento específico para cordoalhas. Uma possível explicação para a não linearidade levantada inicialmente foi: ao carregar o prisma, mesmo com tensões abaixo dos 30% do f_c do concreto, ocorre uma pequena fissuração da matriz cimentícia. O surgimento de fissuras provoca aumento no tempo de percurso da onda, portanto, gera diminuição na sua velocidade. Assim, quando o concreto está submetido a baixos valores de tensão a influência da fissuração sobre a velocidade das ondas poderia ser maior do que a influência da tensão sobre a velocidade, o que causaria diminuição na velocidade da onda. Para valores maiores de tensão esta poderia ter uma influência maior sobre a velocidade das ondas do que a fissuração, o que causaria um aumento na velocidade da onda. Portanto, a não linearidade seria causada pelo efeito conjunto da tensão e fissuração sobre a variação da velocidade das ondas ultrassônicas. No entanto, sabe-se que para um mesmo valor de tensão gerada no concreto, a fissuração no material é maior quando sua resistência à compressão é menor. Deste modo, os prismas 6, 8 e 10, que apresentam os menores valores de resistência à compressão, possuem maior fissuração que os demais para iguais valores de tensão a qual são submetidos. Assim, a influência das fissuras na velocidade das ondas nos prismas 6, 8 e 10 é maior do que nos demais prismas para iguais valores de tensão. Se a hipótese citada anteriormente estivesse correta, a influência das fissuras que surgem no início do carregamento seria maior que a da tensão gerando o trecho não linear. Como nos prismas 6, 8 e 10 surgem mais fissuras, a velocidade das ondas nestes prismas seria mais afetada por elas do que nos demais, mas isto não ocorre. Primeiro, porque o trecho inicial das curvas referentes às OC₂₁ nos prismas 6 e 8 não contém a não linearidade (ver figuras 5.11 e 5.13), enquanto que em prismas com resistências maiores isto ocorre. Além disto, para um mesmo intervalo de tensões no início do carregamento, as velocidades

V_{12} deveriam diminuir mais nos prismas 6, 8 e 10 do que nos outros prismas, o que também não acontece (figura 5.19). Nos prismas 6, 8 e 10, estas velocidades também deveriam começar a aumentar para valores maiores de tensão do que nos demais prismas. Afinal, com uma quantidade maior de fissuração no concreto seria preciso de tensões maiores para superar a influência das fissuras sobre as velocidades das ondas. Isto também não é observado na figura 5.19. Portanto, provavelmente não é a influência das novas fissuras sobre a velocidade das ondas que promove o surgimento da não linearidade das curvas no início do carregamento. Infelizmente, no presente trabalho não foi encontrada uma explicação para este comportamento discrepante das ondas ultrassônicas no início do carregamento dos elementos estudados.

Verificou-se que na curva referente à OC_{12} do prisma 5 (figura 5.10) o trecho não linear ocorreu para tensões entre 0 e 12,33 % do f_c do concreto. Este foi o maior intervalo encontrado para as não linearidades das curvas dos prismas. A tabela 5.5 apresenta o valor do intervalo (em % do f_c) em que foram encontrados os trechos não lineares das curvas de cada prisma. Este valor não foi informado para as ondas cujas curvas não apresentaram este trecho.

Tabela 5.5 - Intervalos de tensão (em % do f_c) dos trechos não lineares das curvas referentes às ondas para cada prisma.

Prismas	fc (MPa)	Intervalo (% do fc)		
		OC_{12}	OL_{11}	OC_{21}
P1	49.52	5.39	3.59	-
P2	49.52	7.18	5.39	7.18
P3	49.52	8.97	8.97	7.18
P4	52.39	6.79	6.79	6.79
P5	43.25	12.33	6.17	8.22
P6	30.28	8.81	7.34	-
P7	50.35	8.83	8.83	5.3
P8	29.08	7.64	1.53	-
P9	39.61	8.97	4.49	6.73
P10	23.91	3.72	-	3.72
P11	43.39	8.19	-	-
P12	46.06	5.79	3.86	5.79

Nos 12 prismas, foi verificado que a partir de uma determinada carga aplicada a taxa de aumento de velocidade começou a diminuir nas ondas OC_{12} e OC_{21} . Nos prismas em que esta diminuição foi maior, foi possível notar no trecho final do gráfico uma redução na

inclinação da curva (figuras 5.6, 5.8, 5.9, 5.13 e 5.15 a 5.17). Como as cargas finais promoveram tensões mais próximas dos 30% do f_c do concreto, provavelmente a queda na taxa de aumento da velocidade ocorreu pelo aumento no surgimento de fissuras no concreto. Isto porque as fissuras são preenchidas com ar e sabe-se que as ondas de cisalhamento não se propagam em materiais gasosos. Portanto, estas ondas sofrem reflexões ao se depararem com fissurações no caminho de propagação. Com isto, elas levam um tempo maior para chegar ao transdutor receptor, conseqüentemente, a velocidade destas ondas diminui. Como existe também a influência do aumento da tensão no valor das velocidades das ondas, se a influência da tensão for maior, o aumento da velocidade continua a ocorrer, mas com uma taxa menor, por conta do surgimento da influência da fissuração.

Esta observação foi ainda mais evidente nos gráficos referentes ao prisma 11 (figura 5.16) que apresentou trincas no final do ensaio (ver figura 5.22). Com isto, a fissuração que surgiu neste prisma foi maior do que nos demais. Assim, a diminuição na inclinação no final das curvas das OC_{12} e OC_{21} para o prisma 11 foi maior em relação aos outros prismas. Observou-se que com a aplicação do último incremento de carga neste prisma a velocidade destas ondas praticamente não se alterou. Provavelmente, a fissuração gerada foi tão grande que a sua influência sobre a velocidade das ondas foi praticamente igual à influência do aumento de tensão. Vale observar que o rompimento do prisma 11 durante o ensaio não era esperado, afinal, em todos os ensaios a carga máxima aplicada foi calculada para promover tensões abaixo dos 30% do f_c do concreto.



Figura 5.22 - Trincas no prisma 11 após o 1º ensaio.

Nas figuras 5.6, 5.8 a 5.14 e 5.17, observou-se também que as curvas referentes às ondas OC_{21} e OC_{12} se tornaram praticamente paralelas a partir do ponto em que estas curvas deixaram de ter a não linearidade que elas geralmente apresentam no início do carregamento. Isto significa que a taxa de ganho de velocidade das ondas OC_{21} e OC_{12} passou a ser aproximadamente a mesma. Como este paralelismo ocorreu para a maioria dos prismas, ele pode ser um padrão entre esses dois tipos de onda.

A partir das curvas da variação relativa da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas em função do nível de tensão aplicada no concreto foram calculados os coeficientes acustoelásticos A_{11} , A_{12} , A_{21} e A_{22} . Foi visto anteriormente que estes coeficientes correspondem à declividade da reta originada pela relação entre $\Delta V/V_0$ e a tensão no material (equação 2.16). No entanto, foi observado que na maioria dos gráficos gerados por esta relação existem trechos não lineares. Portanto, para obter os coeficientes acustoelásticos foi necessário identificar o trecho que mais se aproximava do linear nos gráficos das figuras 5.6 a 5.17 e realizar uma regressão linear.

Nas figuras 5.23 e 5.24 são apresentadas as regressões lineares realizadas nos gráficos referentes às ondas OL_{11} , OC_{12} , OC_{21} e OL_{22} do prisma 3 para a determinação de A_{11} , A_{12} , A_{21} e A_{22} , respectivamente. As regressões obtidas para as curvas dos outros prismas estão apresentadas na figura C.1 a figura C.22 do apêndice C.

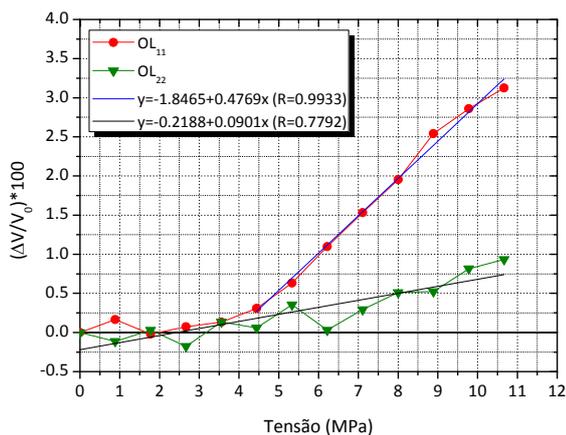


Figura 5.23 - Regressão linear nos gráficos referentes às OL_{11} e OL_{22} para o prisma 3.

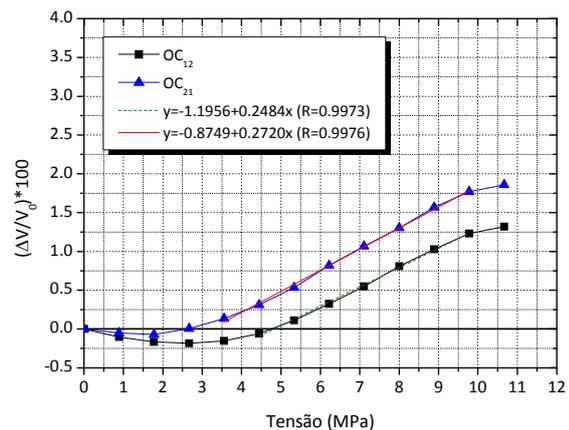


Figura 5.24 - Regressão linear nos gráficos referentes às OL_{12} e OL_{21} para o prisma 3.

A figura 5.25 exibe os coeficientes acustoelásticos calculados para o concreto dos prismas 1 ao 12. Maiores coeficientes indicam que a onda tem uma sensibilidade acustoelástica maior, ou seja, que sofre maior variação na velocidade com o aumento de

tensão no material. Em geral, observou-se que as OL_{11} foram mais sensíveis do que as OC_{21} que, por sua vez, possuíram maior sensibilidade que as OC_{12} , confirmando o que foi verificado nas figuras 5.6 a 5.17. Os coeficientes das ondas OL_{22} (A_{22}) possuíram os valores mais baixos, pois, a velocidade destas ondas variou pouco conforme a tensão no material em relação aos demais tipos de onda. Os valores de A_{22} para os prismas 2 e 11 foram os mais baixos e muito próximos do zero pois, nestes prismas, as V_{22} praticamente não apresentaram variação.

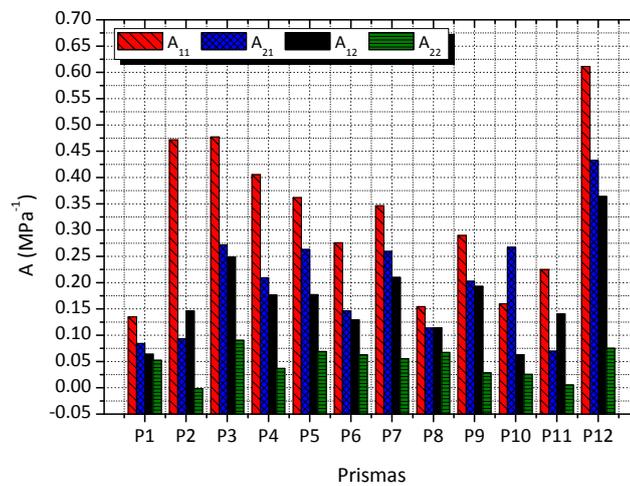


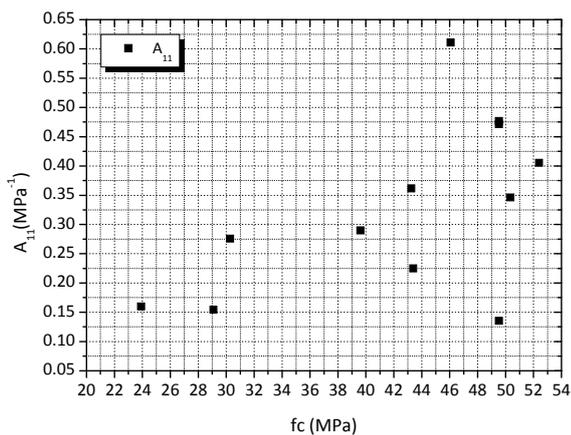
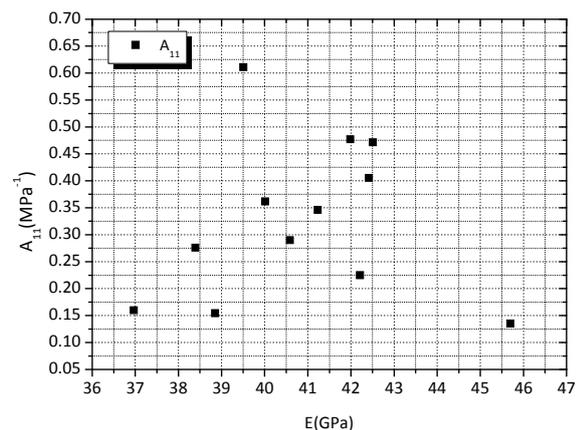
Figura 5.25 - Coeficientes acustoelásticos dos prismas 1 a 12.

A tabela 5.6 apresenta os valores dos coeficientes acustoelásticos de cada prisma e os respectivos coeficientes de determinação (R^2) do modelo de regressão linear adotado para cada curva.

Tabela 5.6 - Coeficientes acustoelásticos e seus respectivos R^2 para cada prisma.

Prismas	A_{11}	R^2	A_{21}	R^2	A_{12}	R^2	A_{22}	R^2
P1	0.1351	0.9771	0.0838	0.9882	0.0636	0.9896	0.0522	0.7964
P2	0.4716	0.9894	0.0929	0.9874	0.1461	0.997	-0.0017	-0.0888
P3	0.4769	0.9933	0.272	0.9976	0.2484	0.9973	0.0901	0.7792
P4	0.4053	0.9959	0.2091	0.9907	0.1767	0.9889	0.0368	0.4203
P5	0.3616	0.9941	0.2631	0.9987	0.177	0.9972	0.0689	0.4266
P6	0.2758	0.9323	0.1459	0.9747	0.1295	0.9877	0.0624	0.6039
P7	0.3461	0.9753	0.2594	0.9954	0.2098	0.9905	0.0555	0.6604
P8	0.1543	0.9163	0.1136	0.9912	0.1145	0.9886	0.0672	0.5591
P9	0.2897	0.9729	0.2024	0.9941	0.1929	0.999	0.0284	0.2916
P10	0.1598	0.9507	0.2673	0.9935	0.063	0.9699	0.0255	0.1729
P11	0.2249	0.9454	0.0697	0.9894	0.1404	0.993	0.005	0.0822
P12	0.6109	0.9798	0.4323	0.9953	0.3636	0.9884	0.075	0.4738

As figuras 5.26, 5.27 e 5.28, apresentam gráficos que relacionam, respectivamente, o f_c , E e G do concreto de cada prisma com o seu valor correspondente de A_{11} . Do mesmo modo, estas propriedades também estão relacionadas com o A_{12} nas figuras 5.29 a 5.31, com o A_{21} nas figuras 5.32 a 5.34 e com o A_{22} nas figuras 5.35 a 5.37. Estes gráficos foram desenvolvidos a fim de tentar identificar uma tendência de comportamento na nuvem de pontos.

Figura 5.26 - A_{11} em função da resistência média à compressão do concreto (f_c).Figura 5.27 - A_{11} em função do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto (E).

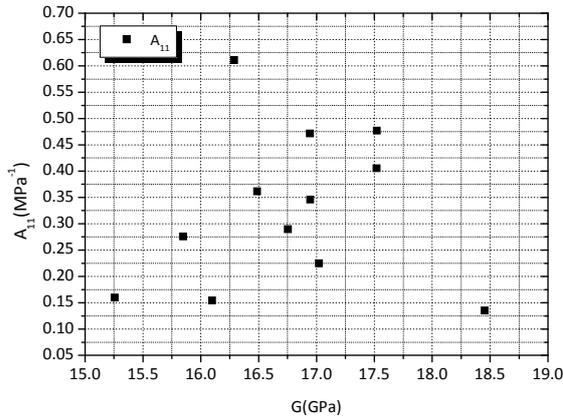


Figura 5.28 - A_{11} em função do módulo de elasticidade transversal dinâmico do concreto (G).

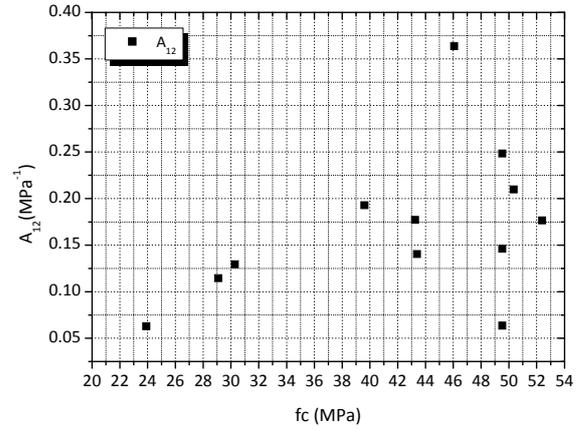


Figura 5.29 - A_{12} em função da resistência média à compressão do concreto (f_c).

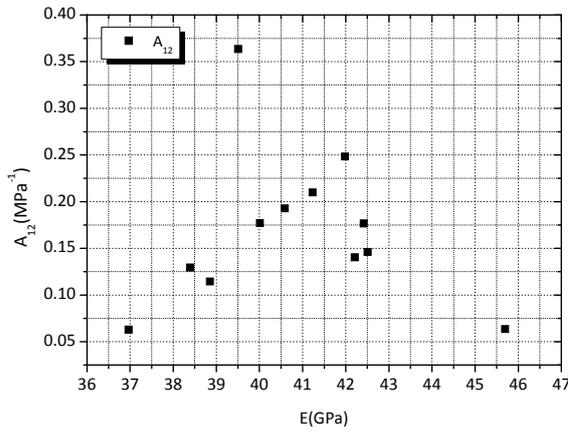


Figura 5.30 - A_{12} em função do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto (E).

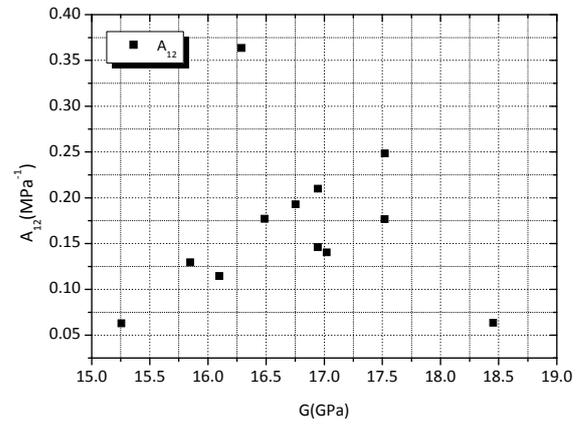


Figura 5.31 - A_{12} em função do módulo de elasticidade transversal dinâmico do concreto (G).

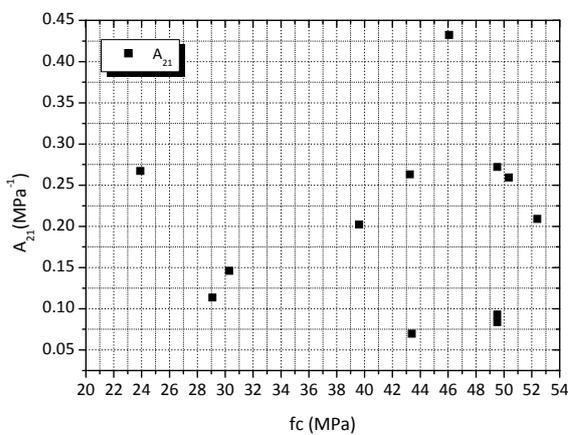


Figura 5.32 - A_{21} em função da resistência média à compressão do concreto (f_c).

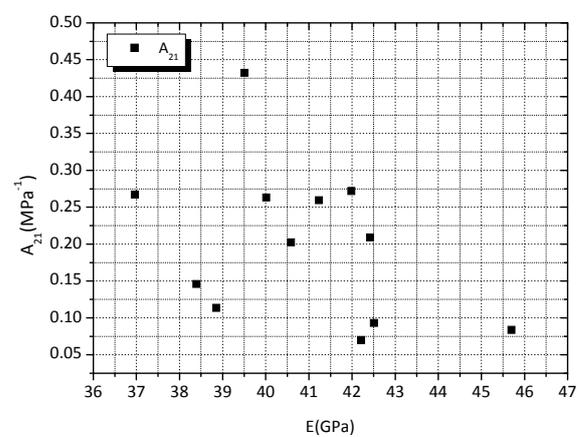


Figura 5.33 - A_{21} em função do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto (E).

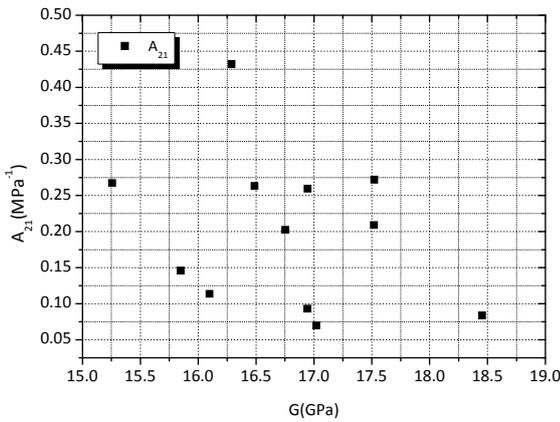


Figura 5.34 - A_{21} em função do módulo de elasticidade transversal dinâmico do concreto (G).

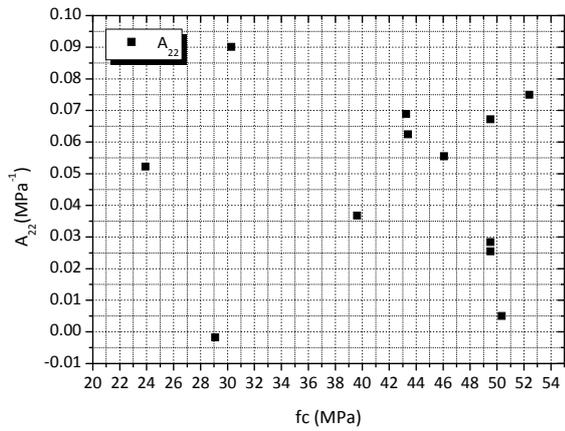


Figura 5.35 - A_{22} em função da resistência média à compressão do concreto (f_c).

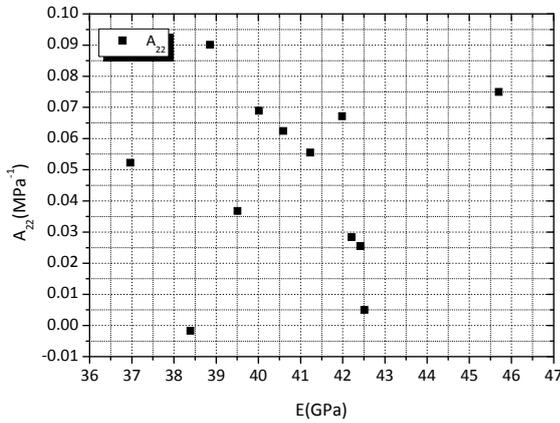


Figura 5.36 - A_{22} em função do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto (E).

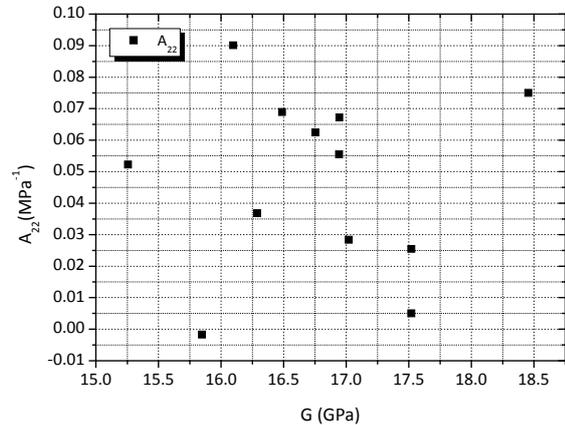


Figura 5.37 - A_{22} em função do módulo de elasticidade transversal dinâmico do concreto (G).

Os pontos nas figuras 5.26, 5.29, 5.32 a 5.37 estão bastante dispersos, portanto não foi possível identificar uma linha de tendência clara formada por eles. No entanto, os coeficientes A_{11} e A_{12} parecem crescer com o aumento dos módulos elásticos. Em resumo, não foi observado um padrão de relacionamento entre qualquer coeficiente acustoelástico e o f_c do concreto e entre os A_{22} e A_{21} e os módulos elásticos. O presente trabalho apresentou um estudo com poucos modelos. Seria interessante estudar um número grande de modelos para cada valor de resistência e trabalhar com um intervalo grande destes valores. Deste modo, os padrões de relacionamento que parecem ter sido encontrados podem ser confirmados e talvez, também sejam observados padrões entre aquelas variáveis que neste trabalho não os apresentaram.

Sugestão de um procedimento para determinação do nível de tensão em uma estrutura real

Se for possível encontrar um padrão de relacionamento entre os coeficientes acustoelásticos e alguma das propriedades do concreto (f_c , E ou G) poderia ser utilizado um modelo de regressão para relacionar estas variáveis. Com isto, a partir de um valor conhecido da propriedade do concreto, seria obtido o valor de seu coeficiente acustoelástico. Com esta informação, existiria a possibilidade de fazer uma estimativa do valor mínimo de tensão σ_{11} atuante num elemento estrutural como um pilar de concreto utilizando a equação 2.16. Sobre o valor de A , o ideal seria obtê-lo a partir de sua relação com o E do concreto e não com o f_c , pois o primeiro poderia ser determinado para o material da própria estrutura (portanto, não seria uma estimativa) por meio de um ensaio com o ultrassom, que é rápido, fácil de realizar e já seria o equipamento utilizado para estimar a tensão mínima na estrutura. Como o E a ser relacionado é aquele com o material livre de tensões, para obtê-lo deveria ser encontrado um local da estrutura onde as tensões normais atuantes fossem praticamente nulas. Este local poderia ser a região próxima à linha neutra de uma viga e afastada do meio do vão (onde o momento fletor é máximo). Além disto, as ondas emitidas na estrutura para obter o E deveriam ser as OL_{22} , pois, como já foi visto nas figuras 5.6 a 5.17, as velocidades destas ondas apresentaram pouca variação conforme o nível de tensão no material. Portanto, para baixos valores de tensão, a velocidade das OL_{22} seria praticamente a mesma que àquela no material livre de tensões.

Após determinar o coeficiente acustoelástico para o concreto do elemento avaliado, seria necessário fornecer um valor de $\Delta V / V_0$ para encontrar o valor de tensão correspondente na equação 2.16. Para tanto, deveriam ser conhecidos V_σ e V_0 . O primeiro valor seria obtido ao emitir as ondas ultrassônicas no elemento estrutural avaliado que estaria tensionado. Num pilar de concreto, por exemplo, onde não se tem acesso às suas extremidades, as ondas emitidas deveriam ser as OC_{21} , portanto a velocidade V_σ seria a V_{21} . Descarta-se medir a V_{22} , pelo fato de ela variar muito pouco em função da tensão. Assim como o E , o valor de V_0 deveria ser obtido num local da estrutura com tensões normais muito baixas.

Obtido $\Delta V / V_0$, o valor de tensão correspondente seria o valor mínimo ($\sigma_{\text{mínimo}}$) da tensão σ_{11} presente no elemento estrutural avaliado. Isto ocorre porque, na realidade, o gráfico da variação relativa da velocidade da onda em função da tensão pode possuir um trecho não

linear para carregamentos iniciais (relação real), como foi visto. Deste modo, a relação real está deslocada a direita da reta teórica (representada pela equação 2.16). A figura 5.38 mostra a reta teórica, a relação real, e os valores de tensão fornecidos por cada uma a partir de um mesmo $\Delta V / V_0$. Nesta figura, tomou-se como exemplo o prisma 5. Assim, o gráfico da relação real foi o obtido para a OC₂₁ no ensaio com o prisma 5 e a reta teórica foi determinada a partir do coeficiente A₂₁ deste prisma (tabela 5.6). Supondo $\Delta V / V_0$ valendo 1%, o $\sigma_{\text{mínimo}}$ é 3.8 MPa e o σ_{real} é 6.6 MPa. Ou seja, o erro cometido ao estimar a tensão no prisma 5 por meio deste procedimento seria de 2.8 MPa.

Portanto, ao avaliar um elemento estrutural por meio do procedimento descrito, é possível estimar o menor valor de tensão (σ_{11}) atuante na estrutura. O valor real seria maior.

O procedimento apresentado seria válido para ser aplicado em elementos de concreto submetidos à tensões normais de compressão de até 30% do f_c quando o comportamento tensão versus deformação do material é considerado linear.

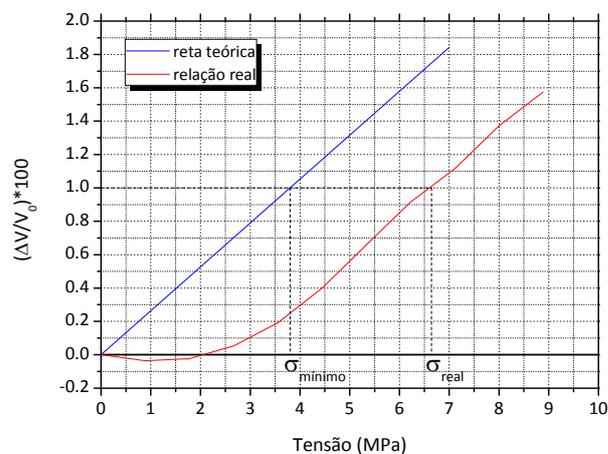


Figura 5.38 - Valores de tensão fornecidos pela reta teórica e pela relação real para um mesmo valor de $\Delta V / V_0$.

Avaliação da variação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas depois do descarregamento

Foi realizada a análise dos valores das velocidades das ondas ultrassônicas nos prismas sem tensão após o descarregamento com o objetivo de compará-las com as medidas iniciais (antes do carregamento). Para tanto, após o término de cada ciclo de carregamento do ensaio, os prismas foram descarregados e um monitoramento foi realizado no qual as ondas eram emitidas em intervalos de 2 minutos durante um determinado tempo. A primeira emissão das

ondas sempre foi realizada logo após descarregar os prismas. Na maioria dos prismas, foram realizadas 3 medições no total, o que levou a 4 minutos de monitoramento com exceção dos prismas 3 e 10. No prisma 10, foram feitas 6 medições, totalizando 10 minutos de acompanhamento. Já no prisma 3, foram emitidas ondas a cada 2 minutos durante 20 minutos e, após aguardar mais 10 minutos, elas foram emitidas mais uma vez, totalizando 30 minutos de monitoramento. Os resultados obtidos para os prismas 3 e 10 estão apresentados nas figuras 5.39 e 5.40, respectivamente, e os obtidos para os demais prismas estão mostrados nas tabelas 5.7 a 5.10.

Nas figuras 5.39 e 5.40, os símbolos vazados indicam a variação relativa de velocidade que as ondas possuem no último valor de carregamento aplicado nos prismas. Os símbolos cheios indicam as variações que ocorreram a partir do descarregamento (em tempo = 0) até o final do monitoramento. A variação relativa de velocidade das ondas no prisma sem tensão antes de aplicar o ciclo de carga é 0.

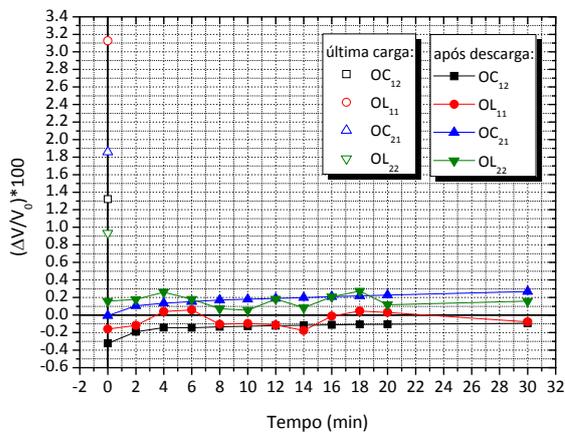


Figura 5.39 - Variação relativa das velocidades para o último valor de carga aplicado no prisma 3 e durante 30 minutos após descarregá-lo.

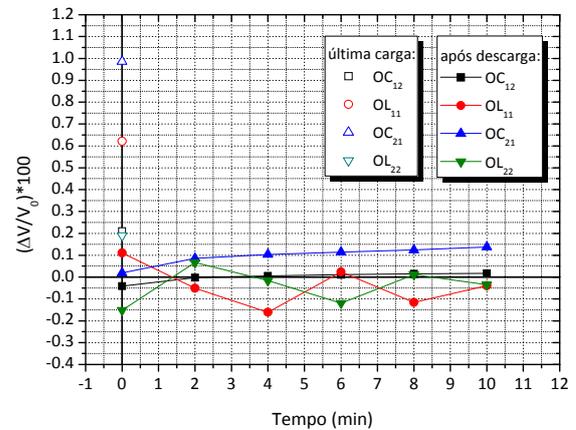


Figura 5.40 - Variação relativa das velocidades para o último valor de carga aplicado no prisma 10 e durante 10 minutos após descarregá-lo.

As tabelas 5.7 a 5.10 mostram a variação relativa da velocidade das ondas quando os prismas estão submetidos ao último valor de carregamento e após o descarregamento, quando foram feitas medições a partir do tempo = 0 (imediatamente após descarregar) até 4 minutos.

Tabela 5.7 - Variação relativa da V_{12} para o último valor de carga aplicado nos prisma 1 ao 12 e durante 4 minutos após descarregá-los.

Prisma	$(\Delta V/V_0)*100$ (%)			
	Última carga	0	2 min.	4 min.
1	0.388	-0.198	-0.136	-0.117
2	1.086	-0.199	-0.184	-
4	0.979	-0.176	-0.065	-0.046
5	0.714	-0.166	-0.095	-0.078
6	0.353	-0.057	-0.014	-0.005
7	0.929	-0.150	-0.066	-0.042
8	0.411	-0.114	-0.072	-0.059
9	0.885	-0.064	0.004	0.022
11	0.804	-0.280	-0.233	-
12	1.926	-0.179	-0.138	-0.118

Tabela 5.8 - Variação relativa da V_{11} para o último valor de carga aplicado nos prisma 1 ao 12 e durante 4 minutos após descarregá-los.

Prisma	$(\Delta V/V_0)*100$ (%)			
	Última carga	0	2 min.	4 min.
1	1.015	-0.494	-0.355	-0.380
2	3.843	-0.445	-0.258	-
4	2.519	-0.134	-0.135	-0.229
5	1.959	-0.097	-0.125	-0.176
6	1.082	0.038	-0.016	-0.002
7	1.666	-0.220	-0.201	-0.143
8	0.846	-0.140	-0.084	-0.101
9	1.683	0.023	-0.081	-0.151
11	2.080	-0.462	-0.374	-
12	4.104	-0.114	-0.070	0.067

Tabela 5.9 - Variação relativa da V_{21} para o último valor de carga aplicado nos prisma 1 ao 12 e durante 4 minutos após descarregá-los.

Prisma	$(\Delta V/V_0)*100$ (%)			
	Última carga	0	2 min.	4 min.
1	0.777	0.141	0.180	0.196
2	0.729	-0.524	-0.478	-
4	1.484	0.107	0.202	0.225
5	1.574	-0.010	0.075	0.098
6	0.858	0.181	0.247	0.269
7	1.644	-0.008	0.107	0.140
8	0.673	0.214	0.262	0.281
9	1.168	0.108	0.184	0.206
11	0.576	-0.472	-0.450	-
12	2.410	-0.168	-0.090	-0.060

Tabela 5.10 - Variação relativa da V_{22} para o último valor de carga aplicado nos prisma 1 ao 12 e durante 4 minutos após descarregá-los.

Prisma	$(\Delta V/V_0)*100$ (%)			
	Última carga	0	2 min.	4 min.
1	0.597	0.248	0.084	0.101
2	-0.003	-0.328	-0.616	-
4	0.379	-0.133	-0.071	0.290
5	0.499	0.119	0.379	0.614
6	0.361	0.455	0.317	0.242
7	0.442	-0.073	-0.148	0.129
8	0.427	0.295	0.335	0.469
9	0.184	-0.269	0.058	-0.391
11	-0.107	-0.308	-0.228	-
12	0.527	0.231	-0.140	0.176

Nas figuras 5.39 e 5.40 e nas tabelas 5.7 a 5.10 ficou evidente o fenômeno acustoelástico ao retirar o carregamento do prisma, quando as variações relativas de velocidade sofreram redução. Durante o monitoramento de todos os prismas, não foi observado que o valor das velocidades voltou a ser o mesmo que era no prisma sem tensão antes de aplicar o ciclo de carga. Notou-se também em todos os prismas que, logo após diminuírem de valor com a retirada do carregamento, as velocidades das ondas cisalhantes (V_{12} e V_{21}) aumentaram continuamente durante todo o monitoramento. Em vários prismas, o valor delas se tornou maior do que era no prisma livre de tensões antes da aplicação do ciclo.

No caso dos pontos das curvas referentes às OL_{11} nas figuras 5.39 e 5.40, observou-se que eles variaram entre valores positivos e negativos, ou seja, as velocidades V_{11} se alteraram entre valores maiores e menores dos que possuíam no prisma antes da aplicação do ciclo. O mesmo ocorreu com os pontos nas curvas das OL_{22} no prisma 10 (figura 5.40). Entretanto, no prisma 3, (figura 5.39) as velocidades destas ondas foram maiores do que àquela no prisma antes do ciclo durante todo o monitoramento. Nas tabelas 5.7 a 5.10, dependendo do prisma, os valores das velocidades das ondas longitudinais (OL_{11} e OL_{22}) apenas diminuíram, apenas aumentaram ou apresentaram ambos os comportamentos durante o monitoramento.

Os valores maiores de velocidade logo após o descarregamento em relação aos valores obtidos no prisma antes da aplicação do ciclo poderiam ser explicados pela existência de uma deformação permanente no concreto. Como o cálculo das velocidades foi feito desconsiderando este fato, ou seja, adotando o ΔS constante, os valores calculados para as velocidades após o descarregamento do prisma seriam maiores do que os calculados antes da aplicação do ciclo. Os valores menores das velocidades logo após o descarregamento também poderiam ser explicados pela ocorrência de fissuração na matriz do concreto durante a aplicação do carregamento. Neste caso, o efeito da fissuração seria preponderante ao efeito da deformação permanente. No entanto, não foi encontrada uma explicação para o comportamento das velocidades das ondas após as primeiras emissões.

5.1 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as análises dos ensaios realizados com os 12 prismas de concreto. O comportamento acustoelástico do concreto de cada prisma foi estudado a partir da elaboração de gráficos que apresentaram a variação relativa da velocidade das ondas ultrassônicas em função do aumento da tensão de compressão no prisma.

Os coeficientes acustoelásticos de cada prisma foram calculados e relacionados com o f_c , E e o G do concreto a fim de encontrar um padrão de comportamento entre estas variáveis. A partir da possibilidade de se identificar um modelo de regressão no conjunto de pontos, é sugerido um procedimento que pode resultar na estimativa do valor mínimo de tensão num elemento estrutural como um pilar de concreto.

A velocidade de propagação das ondas ultrassônicas nos prismas sem tensão aplicada ao final de cada ciclo de carregamento também foi analisada, a fim de compara-las com as velocidades das mesmas ondas no prisma livre de tensões antes de iniciar o ciclo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusão

O presente trabalho apresentou um estudo sobre o uso do ultrassom para a medição de tensões em estruturas de concreto. Para realizar este estudo foi necessário primeiramente desenvolver o programa computacional para informar os tempos de percurso das ondas longitudinais e de cisalhamento presentes num pulso de ondas registrado pelo aparelho de ultrassom.

Foram realizados ensaios com 12 prismas de concreto para a obtenção das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas em diferentes níveis de tensão uniaxial de compressão aplicada no prisma. O efeito acustoelástico do concreto ficou comprovado por meio da elaboração de gráficos que apresentaram a variação relativa das velocidades das ondas conforme o valor de tensão uniaxial de compressão aplicada no material. Mediante estudos feitos no prisma 1, verificou-se que se não forem aplicados ciclos de carga nos prismas antes de realizar os ensaios esses gráficos podem apresentar um comportamento incomum.

As ondas que apresentaram maior variação relativa da velocidade em função da tensão aplicada no concreto foram aquelas cuja direção de vibração é a mesma da aplicação do carregamento, ou seja, as OL_{11} e as OC_{21} . As ondas longitudinais que se propagaram na direção 2 dos prismas (OL_{22}) tiveram a menor variação relativa de velocidade e em alguns prismas esta variação não pôde ser observada. No entanto, a variação notada para as ondas OL_{22} não pode ser atribuída ao efeito acustoelástico. Isto porque se verificou que o coeficiente de variação (c.v.) do tempo de percurso das OL_{22} e a máxima variação relativa da velocidade destas ondas nos prismas possuíram mesma ordem de grandeza.

Observou-se um trecho não linear no início dos gráficos que relacionam a variação relativa da velocidade das ondas ultrassônicas com a tensão no material. No entanto, o presente estudo não encontrou uma explicação para este comportamento. Foi verificado que estes trechos não lineares estavam contidos em intervalos de tensão de até 12.33% do f_c do concreto. Também se notou diminuição na inclinação da curva no final dos gráficos de parte dos prismas. Acredita-se que isto ocorreu devido ao aumento da fissuração no prisma ao final do ensaio, quando o concreto está submetido a tensões próximas dos 30% do f_c . O gráfico

elaborado para o prisma 11, que inesperadamente rompeu, reforça esta hipótese, visto que, o seu trecho final apresenta declividade muito baixa, indicando que as velocidades das ondas nos últimos carregamentos praticamente não se alteraram. Também foi constatado para a maioria dos prismas que, após o trecho não linear inicial, os gráficos referentes às ondas cisalhantes, OC_{12} e OC_{21} , se tornaram praticamente paralelos. Isto sugeriu a existência de um padrão de comportamento entre estes dois tipos de onda, que seria a mesma taxa de ganho de velocidade.

Também foram determinados os coeficientes acustoelásticos referentes ao concreto de cada prisma. Eles foram relacionados com o f_c , E e G dos seus prismas correspondentes a fim de tentar encontrar um padrão de comportamento entre as variáveis. Não foi possível encontrar algum padrão entre os coeficientes acustoelásticos e o f_c e entre os A_{22} e A_{21} e os módulos elásticos. Entretanto, parece existir uma tendência de crescimento dos parâmetros A_{11} e A_{12} em função dos módulos de elasticidade no conjunto de pontos dos gráficos gerados.

A dificuldade em identificar uma linha de tendência no conjunto de pontos gerados nestes gráficos pode ter ocorrido por conta do pequeno número de modelos estudados neste trabalho. Talvez, ao realizar um estudo com um número maior de prismas para cada valor de resistência e trabalhar com um intervalo grande de resistências, seja possível encontrar uma tendência de comportamento no conjunto de pontos.

A partir da possibilidade em se obter um modelo de regressão entre os coeficientes acustoelásticos e propriedades do concreto foi sugerido um procedimento por meio do qual o nível mínimo de tensão normal existente num elemento estrutural como um pilar de concreto poderia ser estimado.

Foi feito também um estudo para verificar as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas no prisma após descarregá-lo e compará-las com aquelas que as ondas possuíam antes de aplicar o ciclo de carregamento. Durante o monitoramento realizado após a retirada da carga dos prismas, verificou-se que as velocidades das ondas após o descarregamento são diferentes daquelas com o prisma sem tensão antes de aplicar o ciclo de carga.

Portanto, verificou-se que é possível estimar tensões em determinadas estruturas de concreto com o uso do ultrassom.

6.2 Propostas para trabalhos futuros

- Executar ensaios em que as cargas aplicadas levem os prismas à tensões próximas da ruptura a fim de estudar o comportamento final da curva $\Delta V/V_0$ x tensão. Assim, a diminuição da inclinação no final da curva pode ser entendida melhor.
- Fazer um longo monitoramento das velocidades das ondas ultrassônicas no prisma sem tensão após descarrega-lo a fim de descobrir quais são os valores destas velocidades quando elas se estabilizam e compará-las com aquelas no prisma livre de tensões antes da aplicação do ciclo de carregamento.
- Realizar os mesmos ensaios apresentados neste trabalho em prismas de concreto armado para estudar a influência das armaduras no efeito acustoelástico.
- Elaborar estudos para tentar encontrar um padrão de relacionamento entre os coeficientes acustoelásticos do concreto e suas propriedades elásticas e, a partir disto, testar o procedimento sugerido para estimar a tensão normal mínima existente num elemento estrutural como um pilar de concreto.
- Estudar o uso de medições indiretas no prisma de concreto a fim de não depender de posicionar os transdutores nas extremidades do elemento estrutural para emitir as ondas na direção das tensões normais (OL_{11} e OC_{12}). Isto seria importante no caso de não se encontrar um padrão de relacionamento entre A_{21} e uma propriedade do concreto, mas conseguir para o A_{11} ou A_{12} .

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.2R-98**: Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. Farmington Hills, MI, 2004.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**. 2011. Disponível em: <http://www.abendieventos.com/Download/apostilaus_2011.pdf> Acesso em: 13 out. 2013.

AGGELIS, D.G. et al. Elastic wave simulation in ground anchors for the estimation of prestress. **Tunnelling and underground space technology**, v. 30, p. 55-63, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 597-02**: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken, PA, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido-Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão - deformação. Rio de Janeiro, 2003.

BRITISH STANDARDS. **BS 1881:203**. Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete. London, 1986 apud MALHOTA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2 ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004.

CARMO, D.C. et al. Identificação por ultra-som das regiões de tensões trativas e compressivas numa barra fletida. **Tecnologia em metalurgia e materiais**, São Paulo, v.4,n.1, p. 13-17, jul.-set. 2007.

CHAKI, S.; BOURSE, G. Stress level measurement in prestressed steel strands using acoustoelastic effect. **Experimental mechanics**, v.49, p.673-681, 2009.

CICHINELLI, G. Como fiscalizar protensões em tabuleiros de pontes. **Materials research = Infraestrutura urbana: projetos, custos e construção**, n.19, 2012. Disponível em <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/19/artigo267610-1.aspx>>. Acesso em: 25 de setembro de 2014.

CORSINI, R. Taludes atirantados. **Materials research** = Infraestrutura urbana: projetos, custos e construção, n.6, 2011. Disponível em <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/6/taludes-atirantados-227250-1.aspx>. Acesso em: 25 de setembro de 2014.

CRAWFORD, G.I. **Guide to nondestructive testing of concrete**. Washington: Federal Highway Administration, 1997.

DIANA[®]. Finite element analysis: user's manual release 9.4, TNO DIANA BV, Delft, The Netherlands; 2009.

GERCINDO, F. **Estudo sobre fatores influentes nos resultados de ensaios não destrutivos em concreto endurecido**. Urbelândia, 2011.

HAACH, V.G. et al.. Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. **NDT&E Internacional**, v. 59, p.18-24, 2013.

HUGHES, D.S.; KELLY, J.L. Second-order elastic deformation of solids. **Physical Review**. v.92, p.1145-1149, 1953.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Guidebook on nondestructive testing of concrete structures**. Vienna, 2002.

JONES, R. Testing of concrete by an ultrasonic pulse technique. In: SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF MATERIALS AND STRUCTURES, v.1, 1954, Paris.

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.

KAPLAN, M.F. The effects of age and water to cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete. **Magazine of concrete research**. v.11, p.85-92, 1959.

KIDD, T.H.; ZHUANG, S.; RAVICHANDRAN, G. Measurement of longitudinal and shear wave speeds in solids. **Society of Experimental Mechanics**, v.47, p. 753-759, 2007.

SCHIAVON, K.F.B.: Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensão em estruturas de concreto

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.

LILLAMAND, I. et al. Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading. **NDT&E Internacional**, v. 43, p.655-660, 2010.

LORENZI et al.. Utilização de ultra-som para o monitoramento de estruturas de concreto. In: PAN-AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, 2003, Rio de Janeiro. Disponível em <<http://www.aaende.org.ar/ingles/sitio/biblioteca/material/T-020.pdf>> Acesso em 15 de janeiro de 2014.

MALHOTA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2 ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004.

MARQUES, P.V; SILVA JUNIOR, S.F.S;. Belo Horizonte: 2006. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/site/cursos/arquivos/168pdf>> Acesso em: 18 ag. 2013.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

OLIVEIRA, M.M.P; CARVALHO, R.D.T. **Materiais piezoelétricos para equipamentos de ultrassonografia**. Santa Rita do Sapucaí: Inatel, 2013.

ORTEGA, L.P.C et al. **Introdução à avaliação de tensões por ultrassom**. 1 ed. Rio de Janeiro: Virtual Científica, 2011.

PROCEQ®. **Instruções operacionais**: Pundit Lab / Pundit Lab⁺ Instrumento ultrassônico. Schwerzenbach: PROCEQ® AS, 2013.

PROCEQ®. **Operating Instructions**: Shear Wave Transducers 250 kHz. Schwerzenbach: PROCEQ® AS, 2013.

TIMOSHENKO, S.P.; GOODIER, J. N. **Teoria da elasticidade**. 3 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

APÊNDICE A

ENSAIO PARA DETERMINAR A DIREÇÃO DE VIBRAÇÃO DAS ONDAS DE CISALHAMENTO

Este ensaio foi realizado para conhecer a direção na qual as ondas de cisalhamento vibram quando são emitidas pelo transdutor emissor. Para tanto, ondas de cisalhamento foram emitidas em um prisma de concreto e suas vibrações foram captadas por acelerômetros. As dimensões do prisma eram de 15 cm x 15 cm x 50 cm. As características do concreto deste prisma, denominado prisma 3, foram apresentadas no item 3.1 e no item 5.

Os equipamentos e materiais utilizados no ensaio foram: um aparelho de ultrassom no modelo PunditLab⁺, um transdutor de cisalhamento de 250 kHz, acoplante para ondas de cisalhamento produzido pela Sonotech, software Pundt Link desenvolvido pela Proceq®, dois acelerômetros, cera de abelha e o software Labview.

Um acelerômetro, denominado a1, foi fixado com cera de abelha em uma das faces laterais do prisma. O outro acelerômetro, denominado a2, foi fixado na face superior do prisma. Foi aplicada uma camada de material acoplante sobre a face do transdutor emissor e este foi posicionado com o seu conector na vertical e voltado para baixo sobre uma das extremidades do prisma. A figura A.1 ilustra o arranjo experimental.



Figura A.1 - Arranjo experimental.

O transdutor emitiu ondas de cisalhamento ao longo do comprimento do prisma. As vibrações causadas por estas ondas no material foram captadas pelos acelerômetros. As

medições da aceleração em função do tempo realizadas por cada acelerômetro puderam ser visualizadas ao longo do ensaio por meio de um gráfico gerado pelo software Labview. O gráfico gerado com os dados exportados deste software é mostrado na figura A.2.

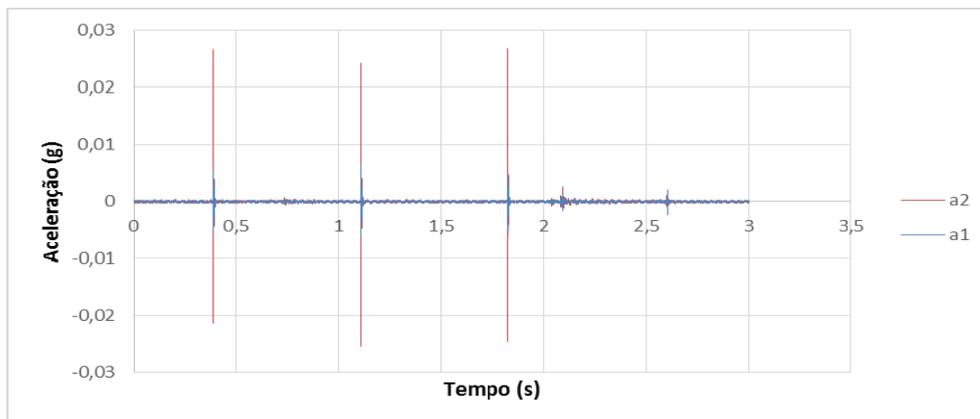


Figura A.2 - Medição da aceleração em função do tempo realizada por cada acelerômetro.

Na figura A.2, foram observados picos em vermelho e em azul que corresponderam à captação da vibração gerada por um pulso de ondas de cisalhamento pelos acelerômetros na face superior e na face lateral do prisma, respectivamente.

Foi observado que os picos em vermelho foram bem maiores que os picos em azul. Ou seja, o acelerômetro na face superior do prisma (a2) captou acelerações maiores do que aquele na face lateral do prisma (a1). Isto significa que as ondas cisalhantes que foram emitidas vibraram verticalmente. Como o transdutor foi posicionado com o seu conector voltado para baixo, conclui-se que as ondas geradas por ele vibram na mesma direção do seu conector (figura A.3).

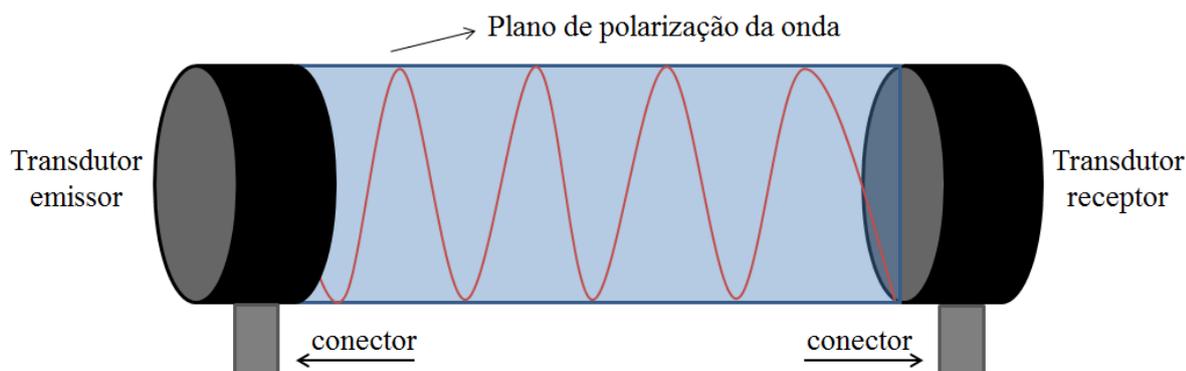


Figura A.3 - Direção de vibração (polarização) da onda emitida pelo transdutor de cisalhamento.

APÊNDICE B

SIMULAÇÃO NUMÉRICA

No presente trabalho, os ensaios com o ultrassom consistiram em aplicar forças de compressão uniaxial no prisma de concreto estudado e ao mesmo tempo emitir ondas ultrassônicas através dele por meio de transdutores posicionados sobre as suas faces. As dimensões dos prismas foram de 15 cm x 15 cm x 50 cm. O carregamento foi aplicado em uma das faces de extremidade do prisma. Durante o procedimento de ensaio, os transdutores precisaram ser posicionados sobre o centro das faces dos prismas. Para que fosse possível posicionar os transdutores, foi necessário colocar em cada extremidade uma peça de aço contendo uma abertura para a entrada do transdutor. A figura B.1 apresenta o esquema de ensaio e as dimensões dos elementos.

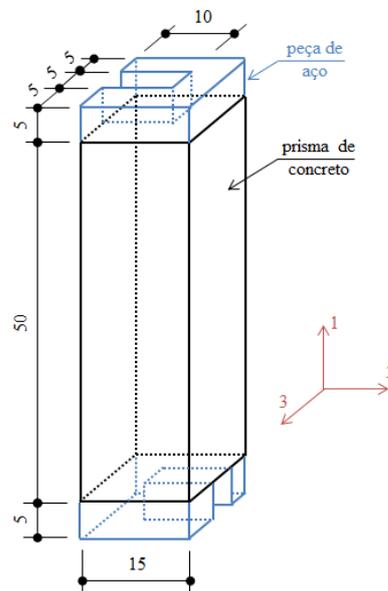


Figura B.1 - Esquema do ensaio (medidas em cm).

Como as placas de aço possuíam aberturas, ao aplicar a carga, a distribuição de tensões gerada no interior do prisma foi menos homogênea do que a que seria gerada caso fossem utilizadas placas sem abertura. A fim de obter uma distribuição de tensões normais uniaxiais na direção 1 (σ_{11}) mais homogênea possível, proporcionando que o caminho de

propagação das ondas tivesse a menor variação no valor das tensões uniaxiais, foram desenvolvidas simulações numéricas para diferentes posições das aberturas das peças de aço no prisma de concreto.

Foram desenvolvidos três modelos numéricos utilizando o Diana (versão 9.4.4), um software de elementos finitos para modelagem numérica. No primeiro, as duas peças de aço foram posicionadas com as suas aberturas mantidas no mesmo lado do prisma (figura B.2a). No segundo, as aberturas formaram um ângulo de 90° entre elas (figura B.2b). No terceiro modelo, as peças foram posicionadas de modo que as aberturas ficaram em lados opostos do prisma (figura B.2c).

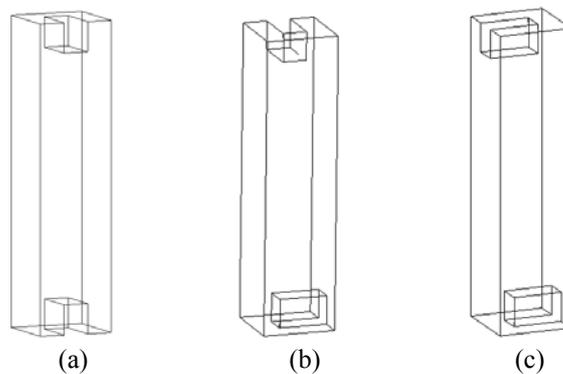


Figura B.2 - Modelos Numéricos: (a) aberturas no mesmo lado do prisma; (b) aberturas formando ângulo de 90° ; (c) aberturas em lados opostos do prisma.

Propriedades gerais dos modelos numéricos

Todos os modelos foram desenvolvidos com o mesmo tipo de elemento finito, o HX24L, que é um elemento sólido em bloco (figura B.3). Este elemento apresenta 8 nós, um em cada vértice, e cada nó possui três graus de liberdade: translação nos eixos 1, 2 e 3. As arestas dos elementos finitos possuem comprimento de 1 cm.

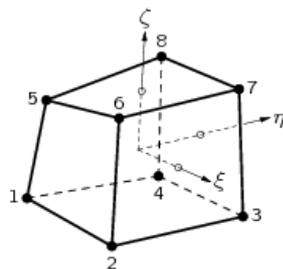


Figura B.3 - Elemento finito sólido do tipo HX24L.
Fonte: DIANA[®] (versão 9.4.4).

O material utilizado para modelar o prisma de concreto possuiu módulo de elasticidade longitudinal de 35 GPa e coeficiente de Poisson de 0.2. O material utilizado na modelagem das peças de aço possuiu módulo de elasticidade longitudinal de 210 GPa e coeficiente de Poisson de 0.3.

Foi aplicado deslocamento vertical de 1 mm em toda a face superior da peça de aço localizada acima do prisma e foram restringidos os deslocamentos nas três direções, 1, 2 e 3, em toda a superfície inferior da peça de aço localizada abaixo do prisma. Na figura B.4 os deslocamentos aplicados sobre a peça de aço estão indicados em rosa e as restrições de deslocamentos na peça de aço sob o prisma estão indicadas em vermelho.

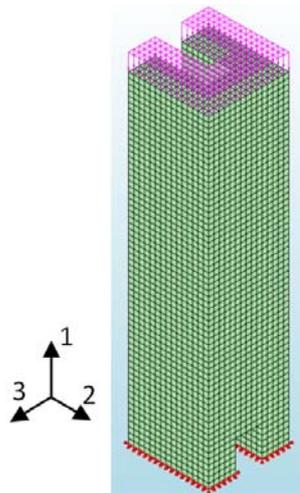


Figura B.4 - Deslocamento aplicado e restrições de deslocamento no modelo numérico.

O tipo de análise utilizada nos modelos foi a linear. A distribuição de tensões na direção 1 (σ_{11}) encontrada em cada modelo numérico é apresentada nos itens a seguir.

Modelo 1

A figura B.5 apresenta o modelo 1 e a nomenclatura utilizada para cada face do prisma. A face indicada em azul corresponde a face 2 e a indicada em vermelho é a face 3. As faces 1 e 4 são opostas as faces 2 e 3, respectivamente. Na figura B.6, é apresentada a distribuição de tensões na direção 1 (σ_{11}) em cada uma das quatro faces do prisma.

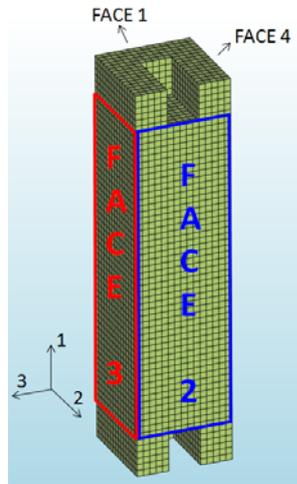
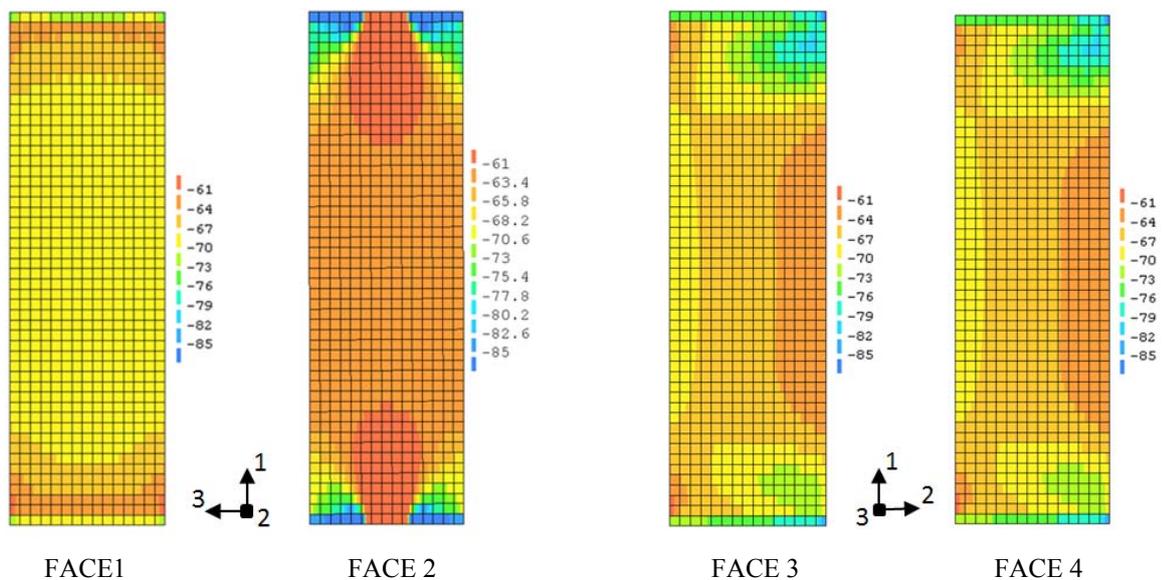


Figura B.5 - Nomenclatura das faces do modelo 1.

Figura B.6 - Distribuição de σ_{11} (em MPa) nas quatro faces do modelo 1.

A partir da distância de 9 cm de ambas as extremidades do prisma a distribuição de tensões σ_{11} na face 1 apresentou valores próximos. Isto também ocorreu na face 2 a partir da distância de 13 cm das extremidades. Na face 1, estes valores estiveram em torno de 70MPa e, na face 2, estiveram em torno de 63 MPa. Já nas faces 3 e 4, a distribuição de tensões σ_{11} foi mais heterogênea na região semelhante à analisada anteriormente. Isto pôde ser observado pelo surgimento de três faixas de diferentes cores. Analisando ambas as faces da esquerda para a direita, observou-se uma variação de tensão entre 70 MPa e 63 MPa.

Modelo 2

Na figura B.7 é apresentado o modelo 2 e o nome atribuído à cada face. As faces 1 e 4 são opostas as faces 2 e 3, respectivamente. A distribuição das tensões na direção 1 (σ_{11}) em cada face é apresentada na figura B.8.

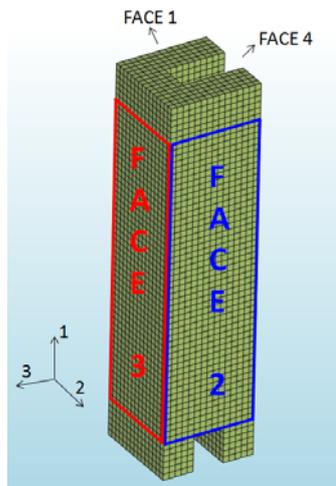


Figura B.7 - Nomenclatura das faces do modelo 2

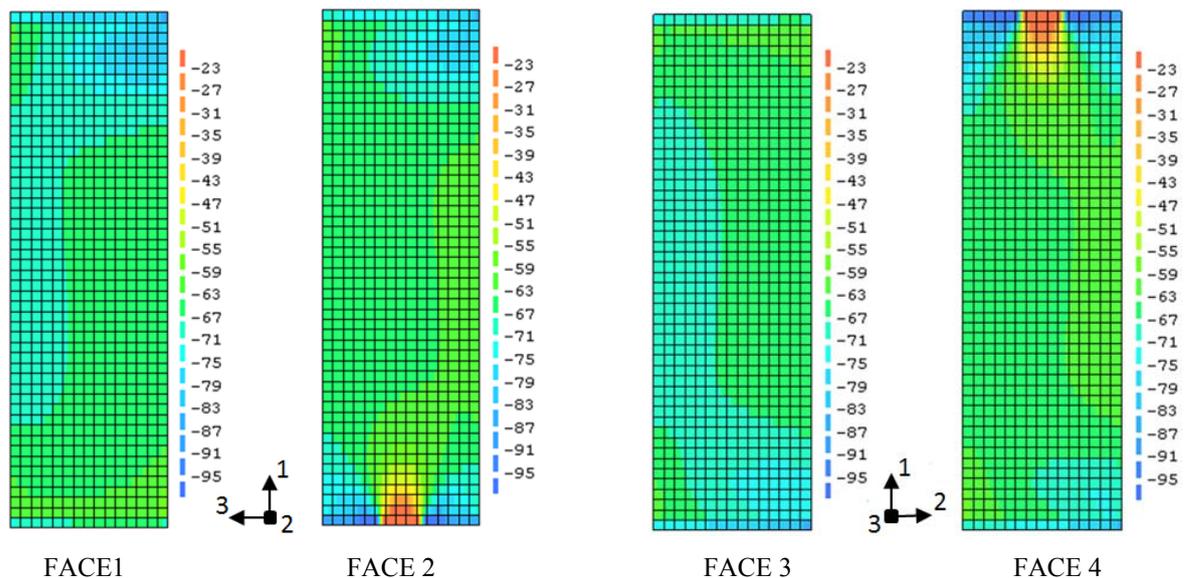


Figura B.8 - Distribuição de σ_{11} (em MPa) nas quatro faces do modelo 2.

Neste modelo, existiram duas faixas de cores diferentes ao longo de cada face. Nas faces 1 e 3, estas faixas corresponderam a valores de tensão σ_{11} em torno de 71 MPa e 67 MPa. Nas faces 2 e 4, os valores das tensões estiveram em torno de 67 MPa e 59 MPa.

Modelo 3

A figura B.9 apresenta o modelo 3 e os nomes atribuídos a cada face. As faces 1 e 4 são opostas as faces 2 e 3, respectivamente. A figura B.10 ilustra a distribuição de tensões na direção 1 (σ_{11}) em cada face do modelo.

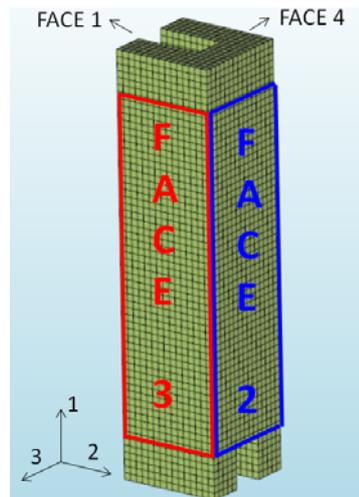


Figura B.9 - Nomenclatura das faces do modelo 3.

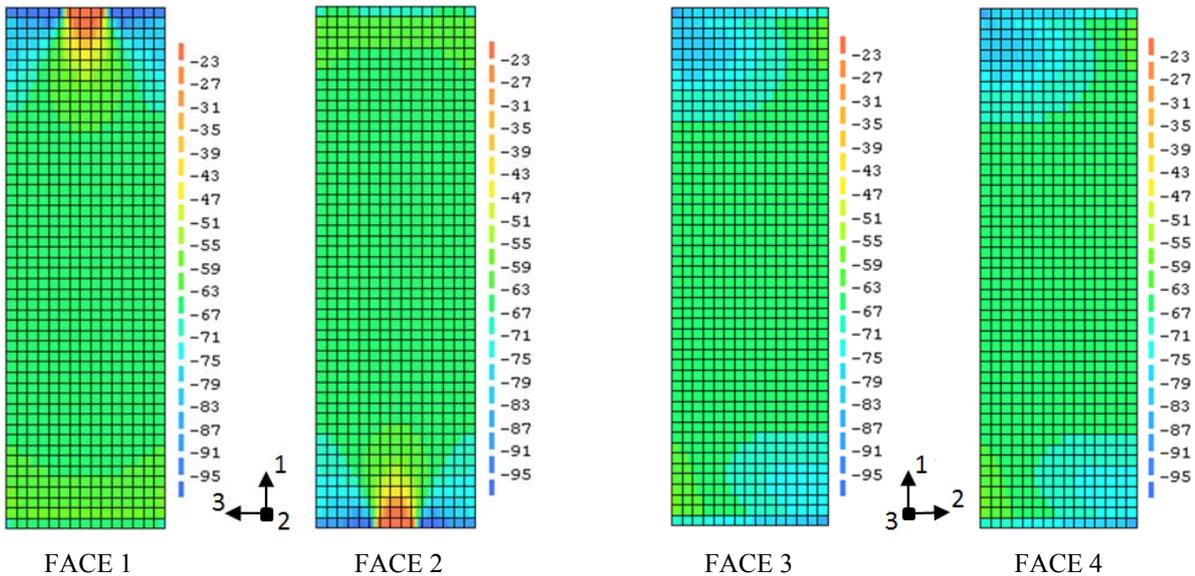


Figura B.10 - Distribuição de σ_{11} (em MPa) nas quatro faces do modelo 3.

Neste modelo, observou-se que a partir da distância de 10 cm de ambas as extremidades do prisma existiu uma distribuição de tensão σ_{11} com valores muito próximos

SCHIAVON, K.F.B.: Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensão em estruturas de concreto

em todas as faces. Isto indicou uma distribuição praticamente uniforme no interior do prisma a partir da distância indicada. Em todas as faces o valor da tensão foi em torno de 67 MPa.

Entre os três modelos, este foi o que apresentou a distribuição de tensão σ_{11} mais uniforme. Portanto, a posição adequada das peças de aço durante os ensaios foi a apresentada no modelo 3, no qual as peças foram posicionadas de modo que as aberturas ficaram em lados opostos do prisma.

APÊNDICE C

Regressões lineares nos gráficos dos prismas 1, 2 e 4 ao 12:

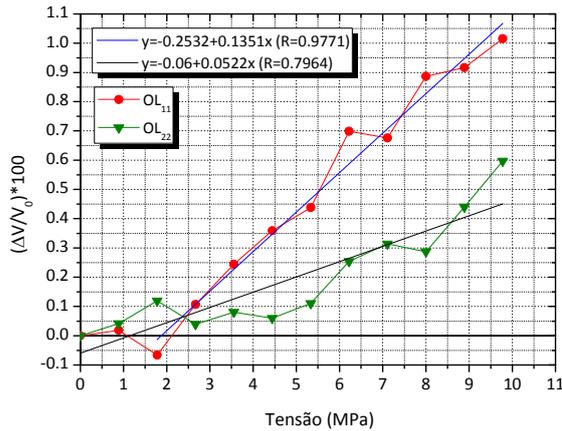


Figura C.1 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL₁₁ e OL₂₂ para o prisma 1.

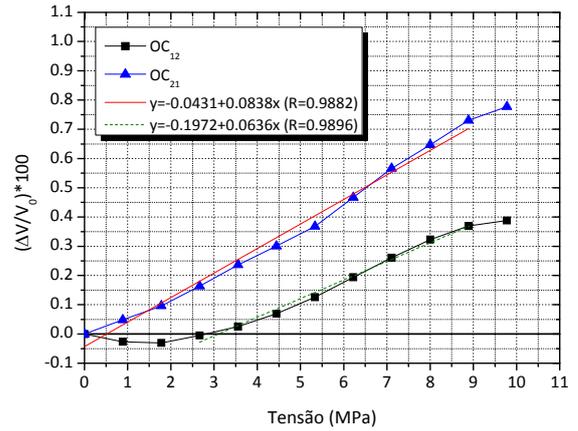


Figura C.2 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC₁₂ e OC₂₁ para o prisma 1.

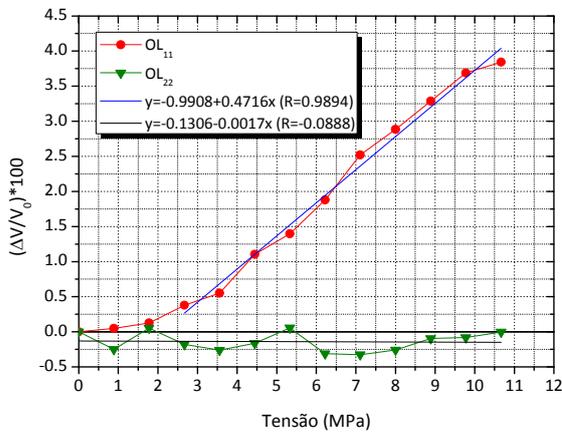


Figura C.3 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL₁₁ e OL₂₂ para o prisma 2.

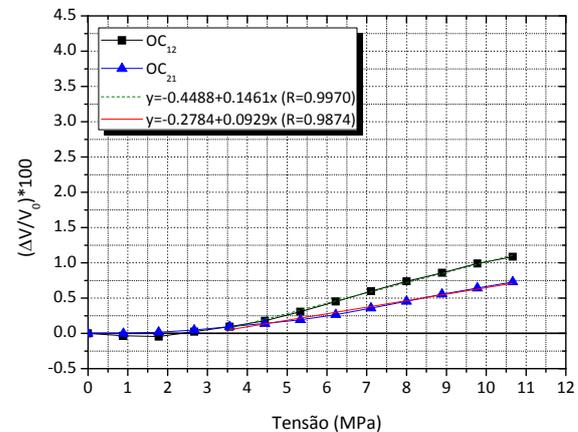


Figura C.4 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC₁₂ e OC₂₁ para o prisma 2.

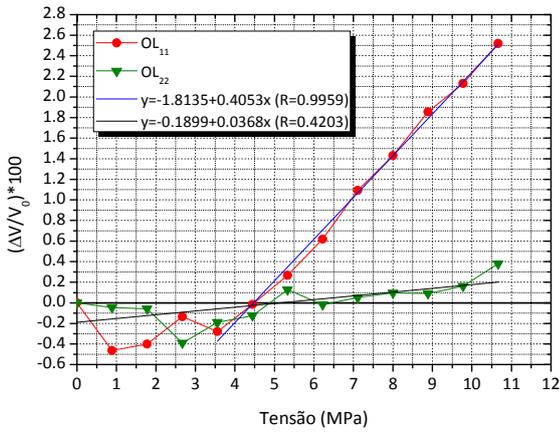


Figura C.5 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL₁₁ e OL₂₂ para o prisma 4.

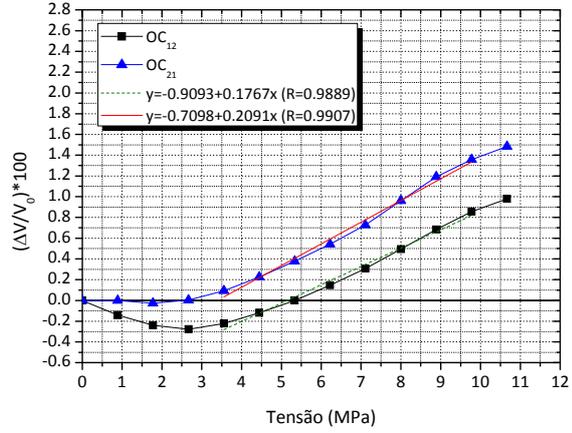


Figura C.6 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC₁₂ e OC₂₁ para o prisma 4.

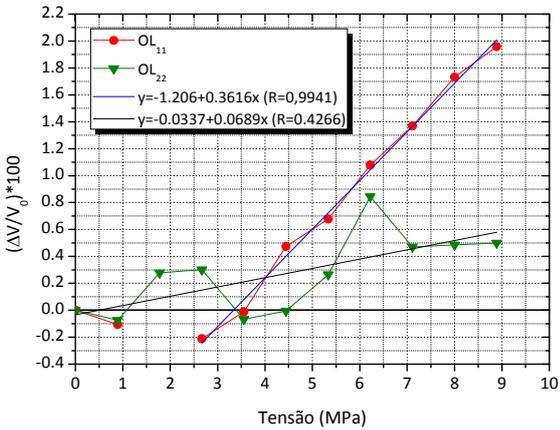


Figura C.7 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL₁₁ e OL₂₂ para o prisma 5.

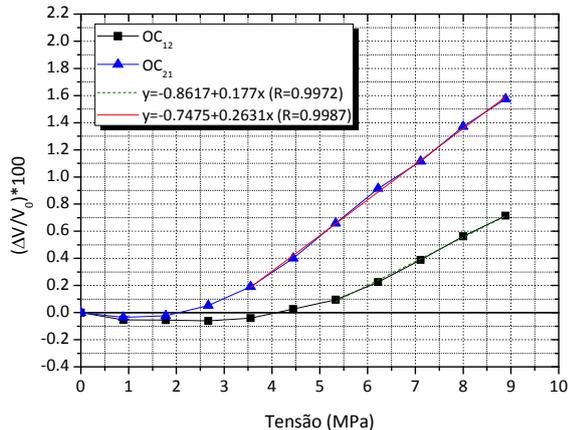


Figura C.8 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC₁₂ e OC₂₁ para o prisma 5.

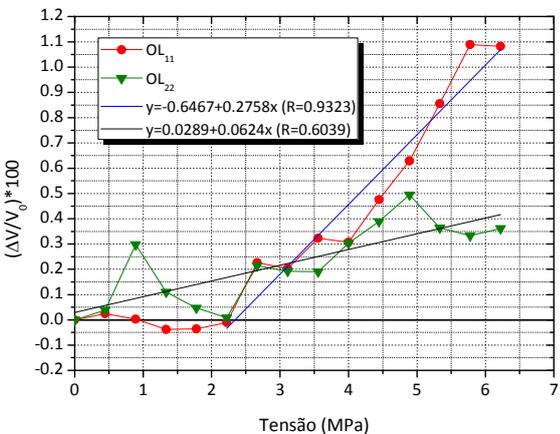


Figura C.9 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL₁₁ e OL₂₂ para o prisma 6.

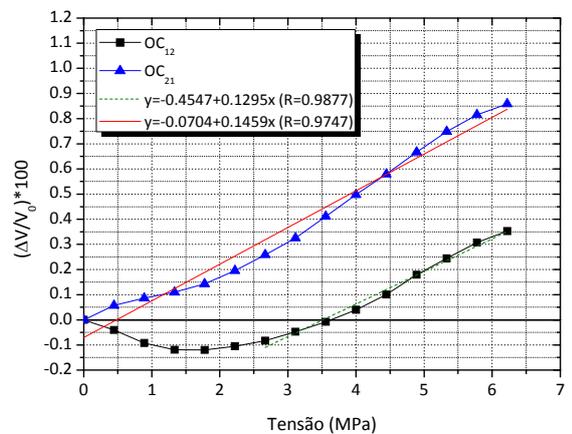


Figura C.10 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC₁₂ e OC₂₁ para o prisma 6.

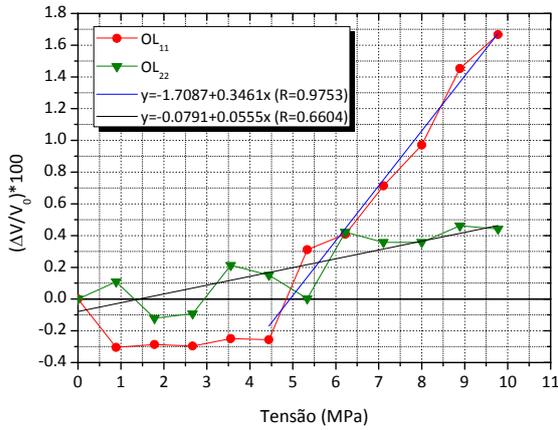


Figura C.11 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL₁₁ e OL₂₂ para o prisma 7.

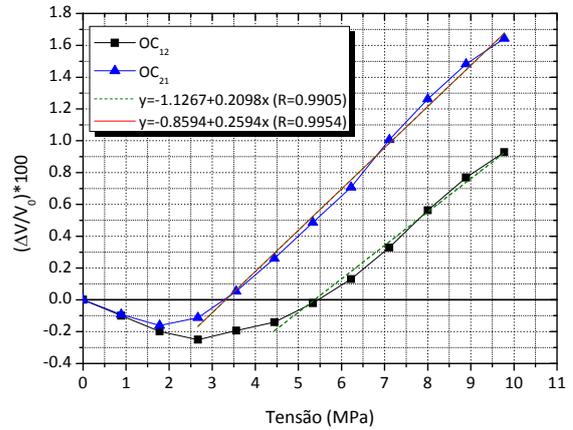


Figura C.12 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC₁₂ e OC₂₁ para o prisma 7.

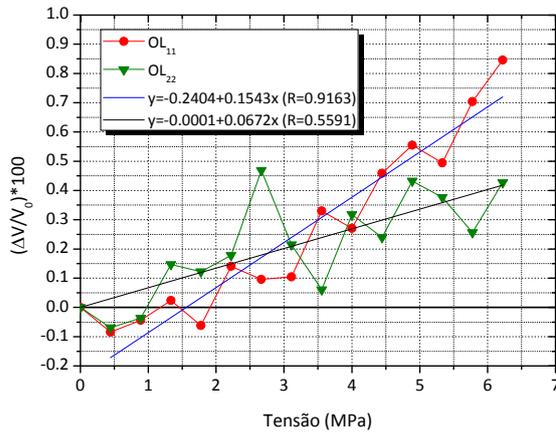


Figura C.13 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL₁₁ e OL₂₂ para o prisma 8.

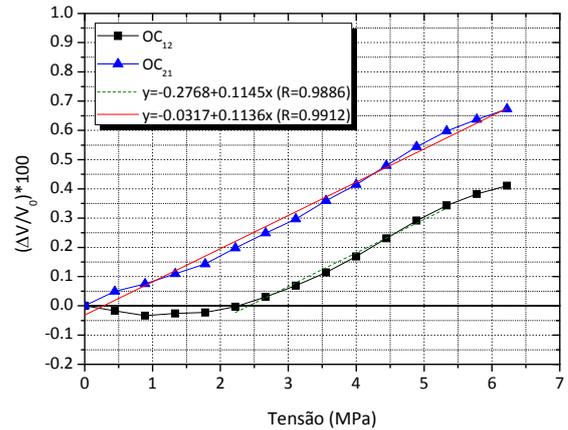


Figura C.14 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC₁₂ e OC₂₁ para o prisma 8.

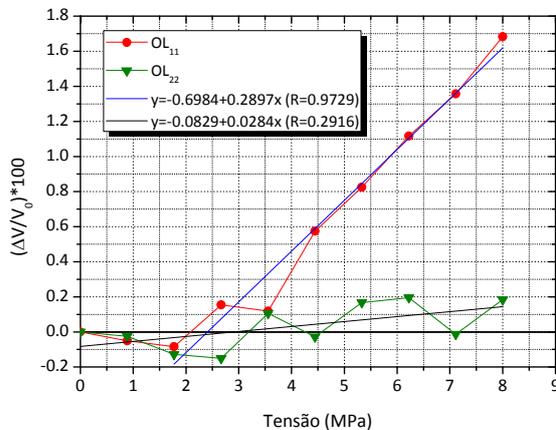


Figura C.15 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL₁₁ e OL₂₂ para o prisma 9.

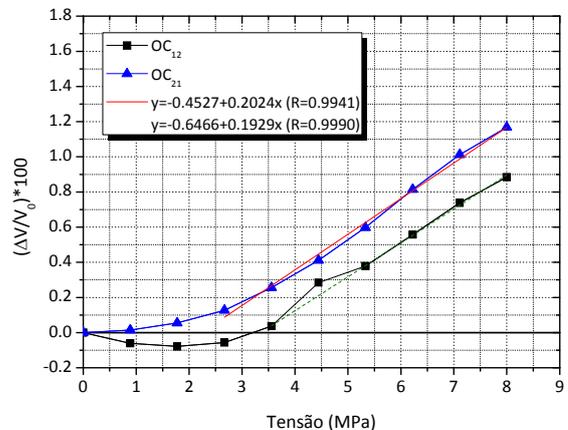


Figura C.16 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC₁₂ e OC₂₁ para o prisma 9.

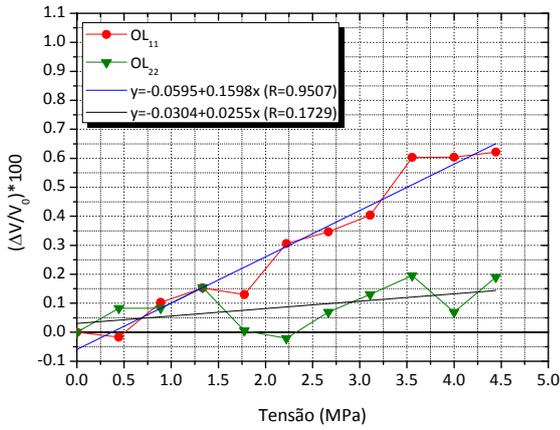


Figura C.17 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL₁₁ e OL₂₂ para o prisma 10.

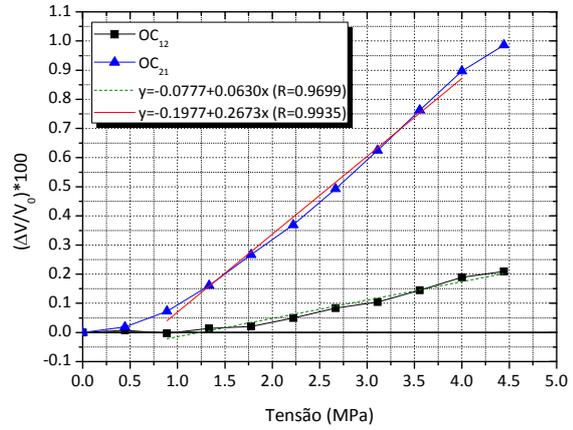


Figura C.18 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC₁₂ e OC₂₁ para o prisma 10.

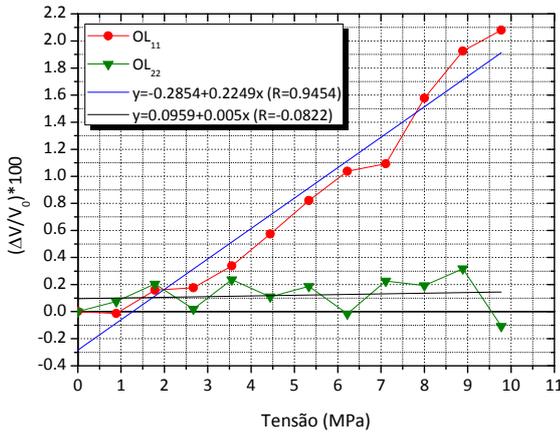


Figura C.19 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL₁₁ e OL₂₂ para o prisma 11.

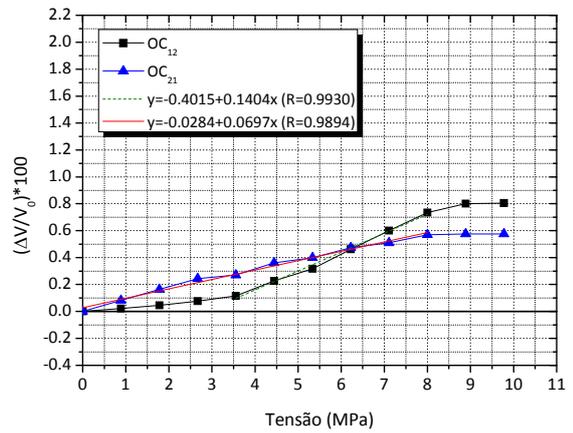


Figura C.20 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC₁₂ e OC₂₁ para o prisma 11.

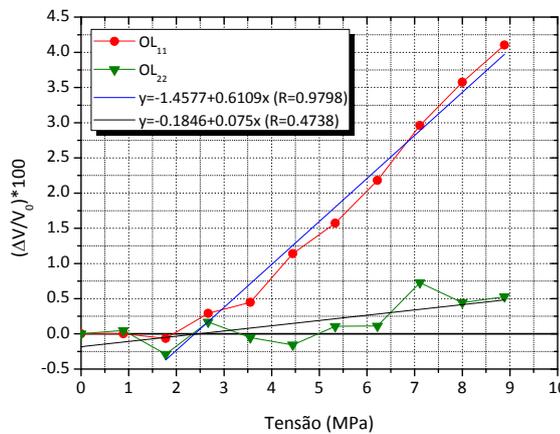


Figura C.21 - Regressão linear nos gráficos referentes à OL₁₁ e OL₂₂ para o prisma 12.

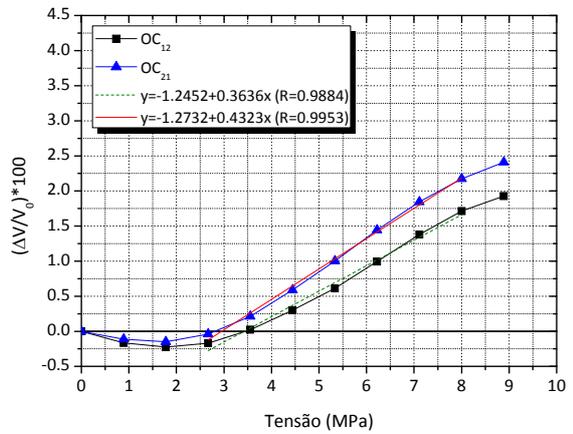


Figura C.22 - Regressão linear nos gráficos referentes à OC₁₂ e OC₂₁ para o prisma 12.